

# Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela GE.23-PP.42

---

**Domazet, Filip**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Engineering / Sveučilište u Rijeci, Tehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:190:729287>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-28**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Engineering](#)



**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**TEHNIČKI FAKULTET**

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**  
**GE.23-PP.42**

Rijeka, rujan 2023.

Filip Domazet  
0069090454

SVEUČILIŠTE U RIJECI

TEHNIČKI FAKULTET

Sveučilišni prijediplomski studij strojarstva

Završni rad

**PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA**

**GE.23-PP.42**

Mentor: izv. prof. dr. sc. Dario Iljkić

Rijeka, rujan 2023.

Filip Domazet

0069090454

## IZJAVA

Ja, Filip Domazet, izjavljujem kako sam završni rad na temu „Procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela GE.23-PP.42“ napisao samostalno, uz stručnu pomoć i vodstvo mentora izv. prof. dr. sc. Daria Ilkića.

Tijekom izrade završnog rada koristio sam znanje stečeno tijekom studija, savjete mentora te stručnu literaturu navedenu na kraju završnog rada.

U Rijeci, rujan 2023.

Filip Domazet

---

## ZAHVALA

Zahvaljujem se svom mentoru izv. prof. dr. sc. Dariu Iljkiću na svakom obliku pomoći, ukazanom povjerenju, utrošenom vremenu, trudu i prenesenom znanju prilikom izrade ovog završnog rada.

Posebno se zahvaljujem svojoj obitelji, roditeljima i sestri, na neizmjernoj podršci tijekom studiranja, strpljenju, brizi i pruženoj ljubavi kako na obrazovnom putu, tako i tijekom cijelog života.

Zahvaljujem se i svim prijateljima na lijepim uspomenama i potpori koju su mi pružali tijekom ovog studija.

# SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. ČELICI .....	2
3. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA .....	4
3.1. Definicija i parametri postupka .....	4
3.2. Dijagram postupka toplinske obrade .....	5
4. UTJECAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA RAVNOTEŽNI DIJAGRAM STANJA Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	6
4.1. Tvorba austenita .....	9
4.2. Pretvorbe pothlađenog austenita .....	11
4.2.1. Tvorba perlita .....	12
4.2.2. Pretvorba u martenzit .....	14
4.2.3. Bainitna pretvorba .....	18
4.3. TTT-dijagrami .....	20
5. KALJIVOST .....	26
5.1. Zakaljivost .....	26
5.2. Prokaljivost .....	28
6. PROCJENA PROKALJIVOSTI .....	30
6.1. Grossmannova metoda .....	30
6.2. Jominyeva metoda .....	33
6.3. Crafs-Lamont metoda .....	37
7. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA GE.23-PP.42 .....	39
7.1. Čelik C45E .....	30
7.2. Čelik 42CrMo4 .....	43
7.3. Čelik 50CrV4 .....	45
8. ZAKLJUČAK .....	47
9. LITERATURA .....	48
10. POPIS SLIKA .....	49
11. POPIS TABLICA .....	50
12. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI .....	51

## 1. UVOD

Zadatak ovog diplomskog rada je procijeniti dubinu prokaljivanja zadanog predloška GE.23-PP.42. Procjena prokaljivosti nekog čelika važna je za njegovu upotrebu budući da direktno opisuje njegovu tvrdoću. Nisu svi čelici prokaljivi. Općenito, prokaljivi čelici imaju veliku tvrdoću i otpornost na habanje, te se upravo zbog tih svojstava koriste u područjima kod kojih je velika tvrdoća od iznimne važnosti.

U ovom radu bit će opisani čelici i opčena primejna toplinske obrade čelika kao uvod u ovaj rad. Osim toga bit će opisani i definirani parametri postupaka kao i dijagrami koji se primjenjuju prilikom toplinske obrade. Osim toga bit će opisan utjecaj legirajućih elemenata na ravnotežni dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>, kao i sama tvorba austenita i pretvorba pothlađenog austenita i TTT-dijagrami. Osim toga bit će objašnjene bitne metode za procjenjivanje prokaljivosti zadanog predloška kao što su Grossmannova i Jominyeva metoda, dok će se Jominyeva metoda primijeniti i u praktičnom dijelu ovoga rada.

Na samom kraju rada provesti će se praktična procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela GE.23-PP.42 na tri različite vrste čelika, čime će se obuhvatiti ranije objašnjene teorijske činjenice, te će se za svaki od tri čelika nacrtati Jominyeva krivulja i U-krivulja koja predstavlja tok tvrdoće za određeni čelik. Sama procjena dubine prokaljivanja strojnog dijela jako je bitno zbog toga što želimo utvrditi tvrdoću strojnog dijela koja je jako važna u određenim situacijama, pogotovo kada se zahtjeva visoka tvrdoća i duga trajnost strojnog dijela.

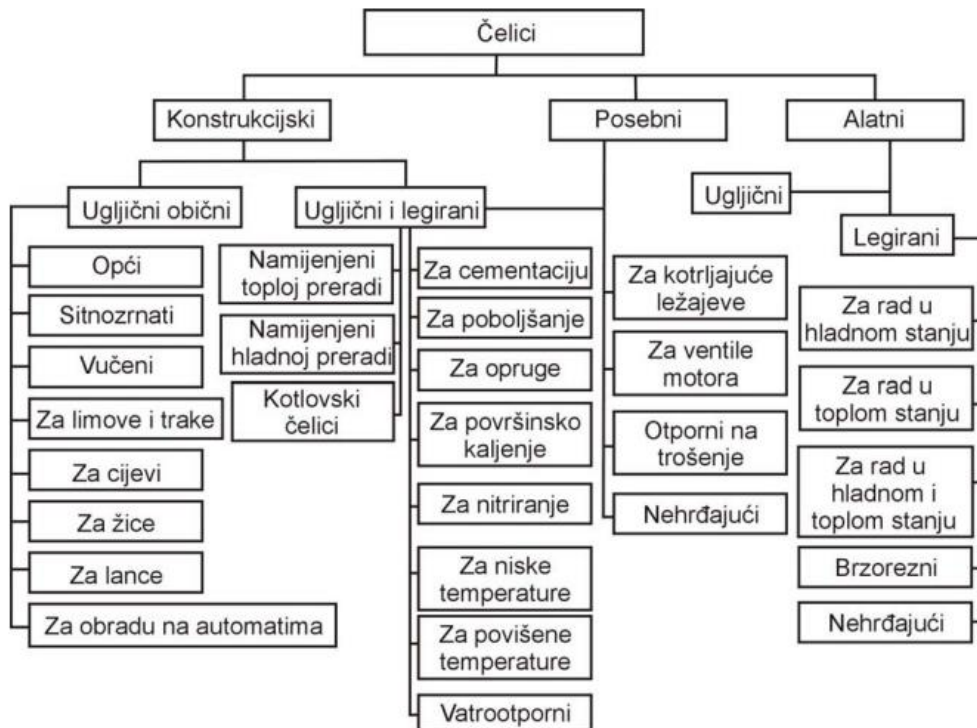
# 1. ČELICI

Čelici obuhvaćaju gotovo sva područja primjene gdje su potrebni materijali visoke žilavosti i čvrstoće. Raspon karakteristika proteže se od obnovljivih i mekih nelegiranih i niskolegiranih jeftinih čelika, do čelika visokih čvrstoća i otpornosti na udarce, pa sve do tvrdih i izdržljivih čelika koji su otporni na intenzivno trošenje. Najvećim dijelom, čelik je obilježen svojstvima poput žilavosti, tvrdoće, visoke čvrstoće, niske i visoke otpornosti na temperaturu, magnetičnosti, toplinske vodljivosti, električne vodljivosti. Također su moguće i kombinacije svojstava: otpornost na trošenje, visoka čvrstoća te žilavost, koje se postižu primjenom cementiranja, površinskog kaljenja ili drugih metoda za modificiranje površina i nanošenje različitih tvrdih slojeva. Ono što izdvaja čelik od drugih materijala je njegova sposobnost prilagodbe svojstava putem različitih postupaka, što ga čini izuzetno fleksibilnim i prilagodljivim materijalom. Čelik se može oblikovati i u toplom i u hladnom stanju, koristeći različite metode poput valjanja, prešanja, kovanja, rezanja, hladnog sabijanja, utiskivanja i sličnog.

Čelici se s obzirom na kemijski sastav dijele u dvije glavne kategorije: specijalne (posebne) i masovne čelike. Pojam "specijalni" čelik odnosi se na željezne legure koje se razlikuju od uobičajenih masovnih čelika zbog njihovih posebnih svojstava. Takva posebna svojstva mogu se postići na tri načina: promjenom kemijskog sastava, prilagodbom proizvodnje te postupcima prerade čelika. Specijalni čelici obično sadrže dodatak jednog ili više elemenata. Ovi čelici se često proizvode dodavanjem pojedinačnih ili kombiniranih legura poput silicija, kroma, mangana, volframa, kobalta, molibdena, bora, nikla, bakra, aluminijska, titana i drugih.

Niskolegirani čelik se definira kao čelik koji ima zbroj masenih udjela svih legirajućih elemenata manji od 5%. S druge strane, visokolegirani čelik sadrži ukupno  $\geq 5\%$  legirajućih elemenata. Važno je napomenuti kako u skupinu specijalnih čelika također spadaju i ugljični nelegirani čelici koji imaju posebna svojstva.





Slika 2.1. Opća podjela čelika

U današnjem svijetu proizvodnje, čelici su ključni tehnički materijali, čineći više od polovice svjetske proizvodnje, što prelazi 900 milijuna tona godišnje. Razlog za takvu preferenciju čelika leži u njegovoj sposobnosti kombiniranja važnih svojstava, uključujući žilavost, čvrstoću, deformabilnost, mogućnost spajanja, obradivost, mogućnost prilagodbe svojstava putem legiranja, obrade deformacijom i toplinske obrade te relativno male cijene.

## 2. TOPLINSKA OBRADA ČELIKA

### 2.1. Definicija i parametri postupka

Toplinska obrada je proces koji namjerno izlaže predmet temperaturnim i vremenskim ciklusima u svrhu dobivanja željenih svojstava i mikrostrukture. Svojstva se mogu mijenjati, osim toplinskom obradom, i drugim postupcima kao što su legiranje i deformiranje, tj. gnječenjem na visokim temperaturama i deformacijom u hladnom stanju. Legiranjem materijala mijenjamo sastav mikrokonstituenata strukture, mobilnost mikrodefekata unutar strukture te veličinu zrna, a deformiranjem materijala mijenjamo oblik kristalnog zrna, oblik uključka i dispergiranost te gustoću dislokacija. Iz mikrostrukture materijala možemo očitati sva njegova svojstva. Budući da vrijeme ohlađivanja nije beskonačno, mikrostrukture čelika dobivene toplinskom obradom neće biti iste kao od onih postignutih u ravnotežnim uvjetima, što rezultira izmijenjenim Fe-Fe<sub>3</sub>C dijagramom. Tehnologije kao što su lijevanje, valjanje, kovanje i zavarivanje se ne može nazvati toplinskom obradom zbog toga što je njihova glavna zadaća promjena oblika, a ne promjena svojstava materijala. Osnovni parametri ovog postupka su temperatura ( $K$ ,  $^{\circ}C$ ) i vrijeme ( $s$ ,  $min$ ,  $h$ ). Parametar brzina se izvodi iz parametara temperature i vremena po formuli:

$$v = \frac{dT}{dt}$$

gdje je:

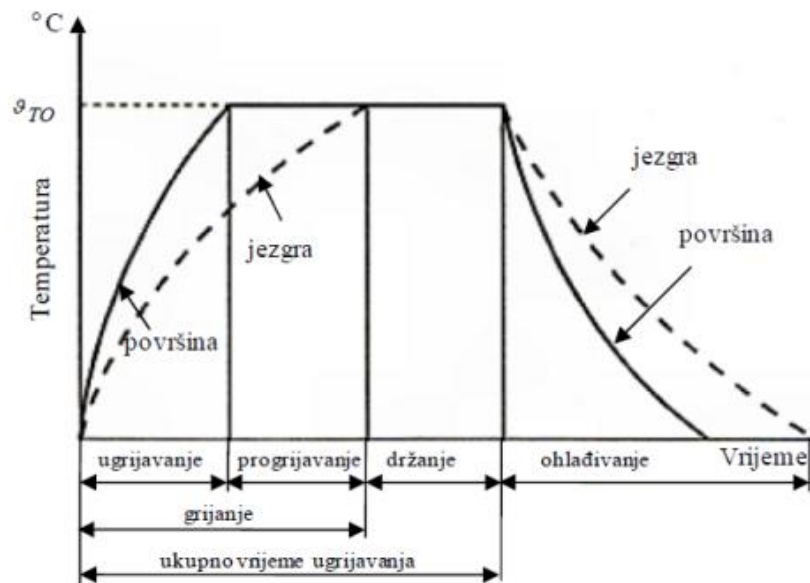
$v$  – brzina ohlađivanja odnosno ugrijavanja ( $^{\circ}C/s$ ,  $^{\circ}C/min$ ,  $^{\circ}C/h$  ili  $K/s$ ,  $K/min$ ,  $K/h$ )

$T$  – temperatura ( $K$ ,  $^{\circ}C$ )

$t$  – vrijeme ( $s$ ,  $min$ ,  $h$ ) [4].

Korištenjem toplinske obrade mogu se postići različite promjene u sustavu slitina. Ovime se mijenjaju svojstva same slitine putem promjena u njezinoj strukturi, uključujući različite vrste, veličine i oblike mikrokonstituenata. Također, toplinska obrada može utjecati na gustoću i vrstu nepravilnosti u kristalnoj strukturi. Važno je napomenuti kako je toplinska obrada složen proces, često povezan s visokim troškovima, koji može iznositi i do 80% ukupnih troškova proizvodnje strojnih dijelova. U praksi se često koriste kombinacije opisanih metoda za postizanje željenih promjena svojstava slitina.

## 2.2. Dijagram postupka toplinske obrade



Slika 3.1. Opći dijagram postupka toplinske obrade

Temperatura koja je označena na dijagramu  $\vartheta_{TO}$  označava iznos temperature u °C pri kojoj se odvija toplinska obrada.

Trajanje ugrijavanja predstavlja period ugrijavanja površinskih slojeva do temperature toplinske obrade ( $\vartheta_{TO}$ ).

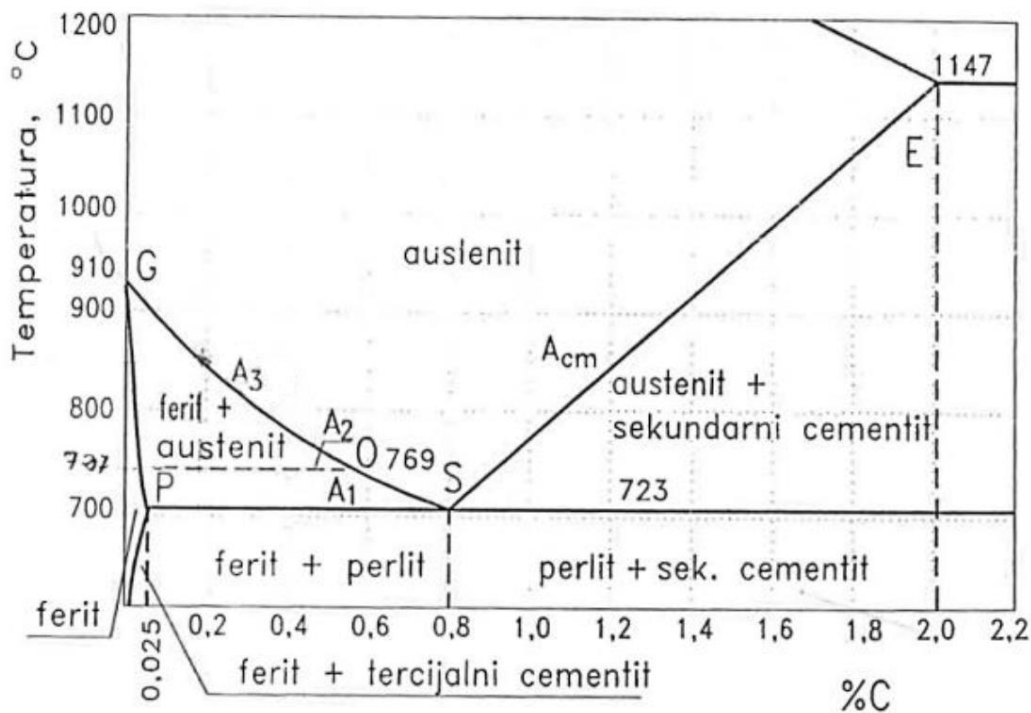
Progrijavanje označava period od trenutka postizanja temperature toplinske obrade površinskih slojeva do trenutka postizanja temperature toplinske obrade svih slojeva jezgre.

Vrijeme grijanja predstavlja ukupno vrijeme trajanja ugrijavanja i progrijavanja.

Držanje predstavlja period održavanja radnog dijela na temperaturi obrade od završetka progrijavanja do početka hlađenja kada su omogućene mikrostrukturalne promjene samog proizvoda.

Ohlađivanje označava period snižavanja temperature radnog dijela odnosno hlađenje svih slojeva jezgre do izjednačavanja sa temperaturom površinskih slojeva i okoline.

### 3. UTJECAJ LEGIRAJUĆIH ELEMENATA NA RAVNOTEŽNI DIJAGRAM STANJA Fe-Fe<sub>3</sub>C



Slika 4.1. Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C

Dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C čelika je osnova u analizi toplinske obrade čelika. Mikrostrukture čelika koje odgovaraju ravnotežnom dijagramu uključuju ferit, perlit, sekundarni cementit i iznad temperature A<sub>1</sub>, austenit. Ferit je kruta otopina ugljika u  $\alpha$ -željezu s najviše 0,025% C. Sekundarni cementit je kemijski spoj, karbid željeza Fe<sub>3</sub>C sa 6,67% C. Perlit je eutektoid sastavljen od eutektoidnih kristala ferita i cementa. Austenit je kruta otopina ugljika u  $\gamma$ -željezu s najviše 2,03% C.

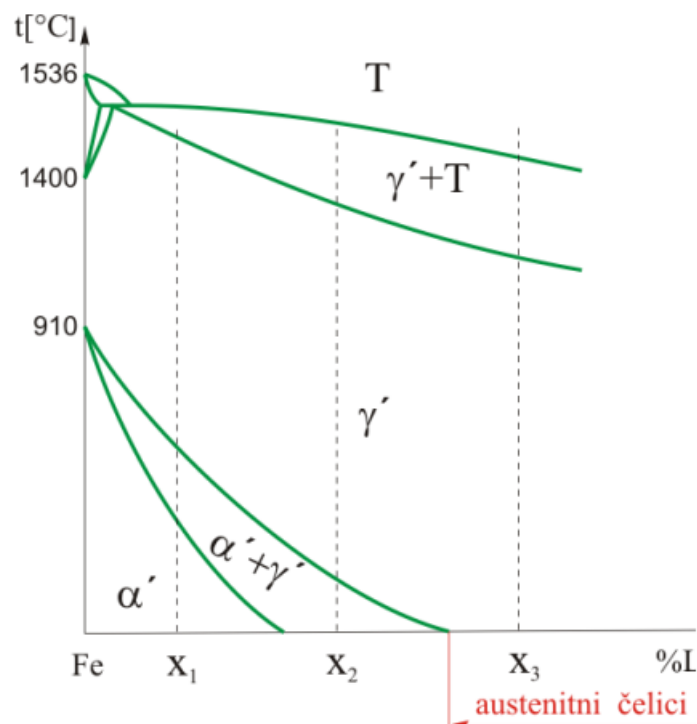
U industrijskim primjenama koriste se čelici koji, osim željeza i ugljika, sadrže različite elemente kao redovite nečistoće i posebno dodane legirne elemente. Svi ovi elementi mijenjaju temperature pretvorbe i topljivost ugljika. Osim toga, dodaci u čeliku mogu samostalno ili u kombinaciji s željezom stvarati karbide i intermetalne spojeve.

Klasifikacija legirnih elemenata na temelju njihovog djelovanja:

1. gamageni legirni elementi
2. alfageni legirni elementi.

Gamageni legirni elementi proširuju raspon austenitnog područja, što znači da snižavaju temperature A3 i A1 (vidljivo na slici 4.2.). Ova skupina uključuje bakar (Cu), mangan (Mn), nikal (Ni) i kobalt (Co). Na dijagramu se uočavaju tri koncentracije:

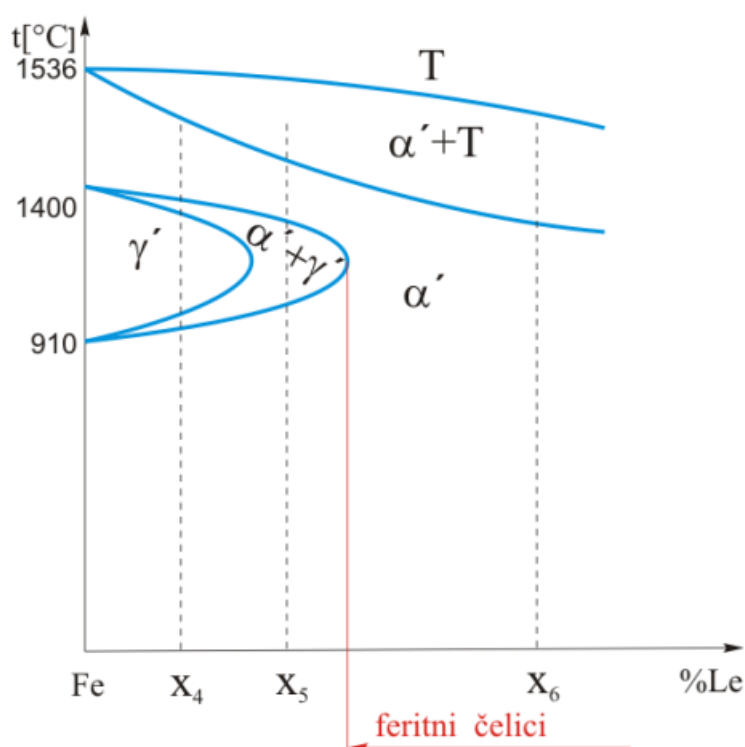
- Legura s koncentracijom  $x_1$ : Ako sadrži ugljik, potpuno je zakaljiva jer tijekom postupka hlađenja i zagrijavanja ferit u potpunosti prelazi u austenit.
- Legura s koncentracijom  $x_2$ : Ako sadrži ugljik, djelomično je zakaljiva jer tijekom postupka hlađenja do sobne temperature, zadržava neki dio austenita. Jedino tijekom dubokog hlađenja je moguća potpuna pretvorba u martenzit.
- Legura s koncentracijom  $x_3$ : Ova legura ima strukturu austenita na sobnoj temperaturi, što znači da nema transformacije ferita u austenit i obratno. Stoga je ova legura nezakaljiva.



Slika 1.2. Binarni dijagram Fe – Le s gamagenim legirnim elementima

Alfageni legirni elementi smanjuju raspon austenitnog područja, što znači da povećavaju temperature A3 i A1 (vidljivo na slici 4.3.). Ova skupina legirnih elemenata uključuje cirkonij (Zr), volfram (W), titan (Ti), vanadij (V), silicij (Si), niobij (Nb), krom (Cr), tantal (Ta) i molibden (Mo). Na dijagramu se uočavaju tri koncentracije:

- Legura s koncentracijom x4: Ako sadrži ugljik, potpuno je zakaljiva jer tijekom postupka hlađenja i zagrijavanja ferit u potpunosti prelazi u austenit.
- Legura s koncentracijom x5: Djelomično je zakaljiva ako sadrži ugljik.
- Legura s koncentracijom x6: Ova legura je nezakaljiva, čak i onda kada sadrži ugljik.



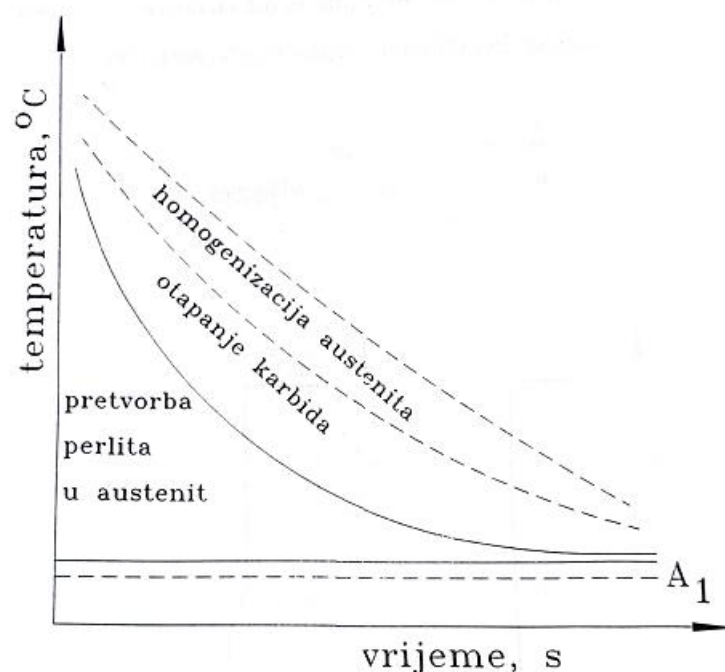
Slika 4.3. Binarni dijagram Fe – Le s alfagenim legirnim elementima

Zaključno, kako nisu zadovoljeni ključni uvjeti za kaljenje koji uključuju prelazak ferita u austenit i obratno odnosno izmjena alotropske strukture, feritni čelici kao i austenitni čelici pripadaju potpuno nezakaljivoj skupini.

### 3.1. Tvorba austenita

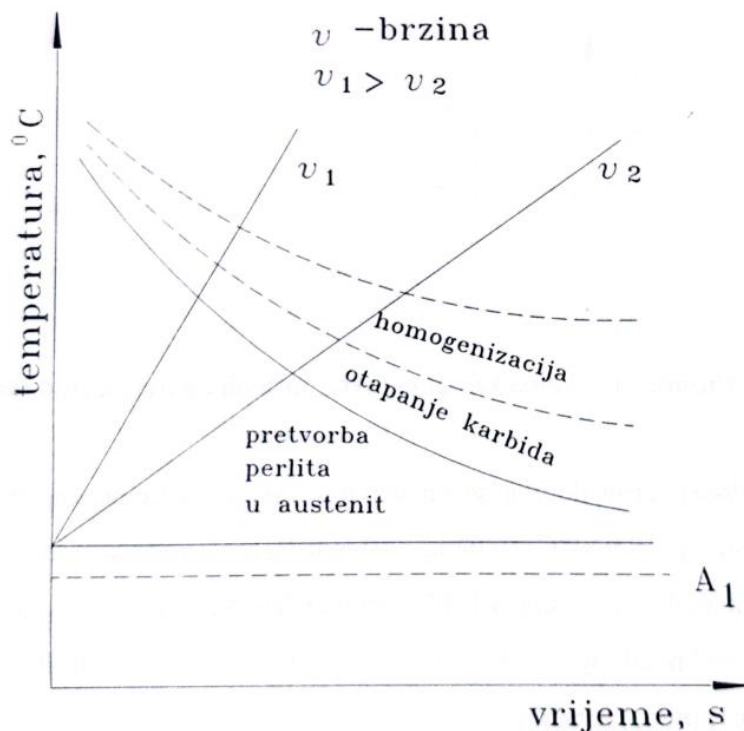
Pri transformaciji austenita, dvije faze s različitim kemijskim sastavom prolaze u treću fazu putem difuzijskog mehanizma. Pri povećanju temperature se stvaraju termodinamički i kinetički uvjeti za stvaranje austenita što omogućava feritno-karbidnoj smjesi pretvorbu u austenit. U tom trenutku austenit sadrži manju vrijednost slobodne energije od feritno-karbidne smjese te je osigurano dovoljno vremena da se difuzijom formira austenit. Austenit se najčešće formira na granici feritne i cementitne faze, gdje se najlakše pojavljuju mjesta koja zadovoljavaju određenu temperaturu i kemijski sastav, što rezultira kritičnom veličinom austenita s minimalnom slobodnom energijom. Daljnji rast austenitne faze uglavnom se ostvaruje putem difuzije ugljika u novonastalom austenitu.

Putem eksperimenata potvrđeno je kako brzina pretvorbe u austenit ovisi o brzini difuzije ugljika u novonastalom austenitu. Povećanje difuzije atoma i razlike u slobodnoj energiji između stabilne i trenutne strukture je moguće sa povišenjem temperature iznad vrijednosti ravnotežne temperature čime je ubrzana austenitna pretvorba.



Slika 4.4. Shema izotermičke tvorbe austenita

Iz dijagrama se može zaključiti kako se s povećanjem temperature trajanje austenitne pretvorbe smanjuje. Homogeni austenit se dobiva postupkom koji se sastoji od austenitne pretvorbe, otapanja karbida te homogenizacije austenita.

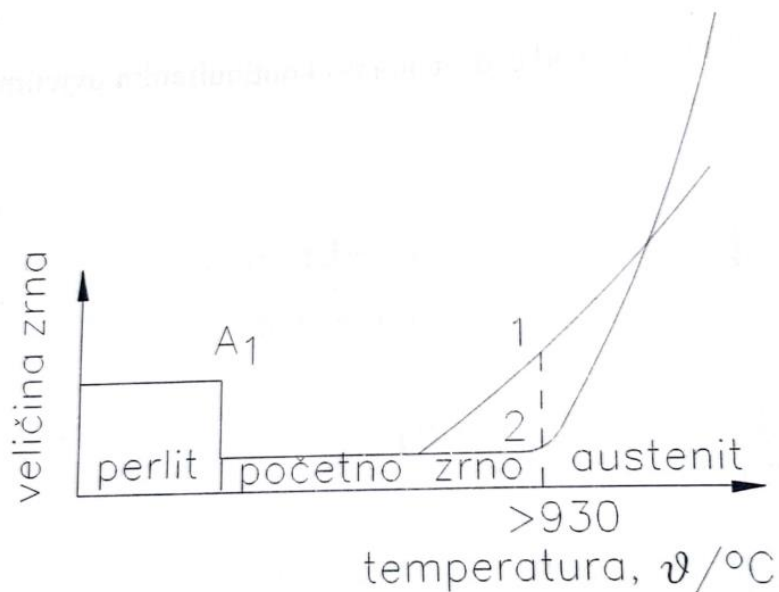


Slika 4.5. Shema tvorbe austenita pri konstantnim uvjetima ugrijavanja

Sa dijagrama se može uočiti kako s povišenjem brzine ugrijavanja dolazi do smanjenja trajanja pretvorbe te bržeg dostizanja viših temperatura. Temperature pretvorbe se pri višim temperaturama ugrijavanja podižu prema većim temperaturama, prvenstveno prema temperaturi  $A_{c3}$ .

Kada je čelik držan na povišenim temperaturama, povećava se veličina kristalnih zrna austenita. Ovaj proces rasta austenitnih zrna je spontan i prati smanjenje slobodne energije. Ovisno o sklonosti rasti austenitnih zrna, postoje dvije vrste čelika: čelici sitnih zrnaca (sitnozrnati čelici) i čelici krupnih zrnaca (krupnozrnati čelici).





Slika 4.6. Promjena veličine austenitnog zrna u ovisnosti o temperaturi

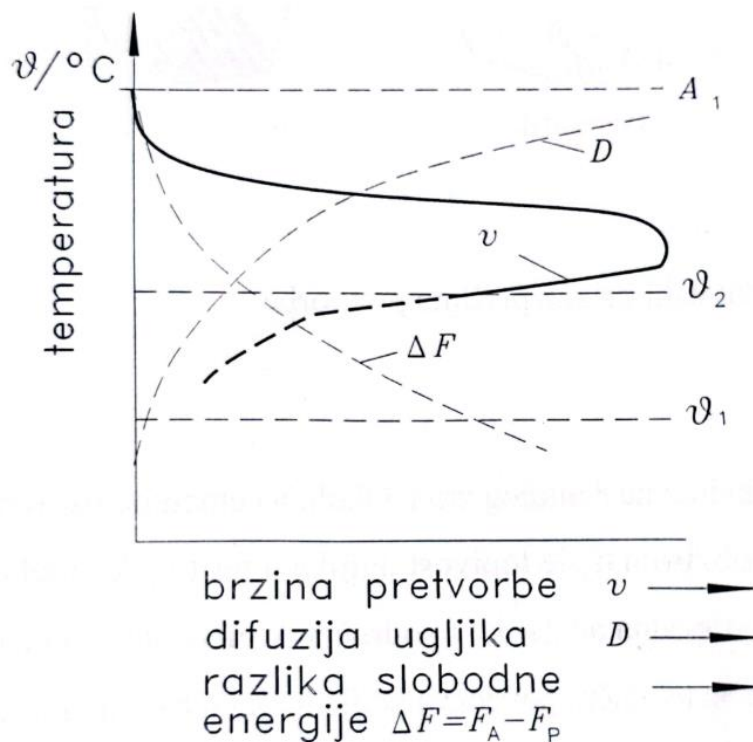
### 3.2. Pretvorbe pothlađenog austenita

Pretvorbe pothlađenog austenita predstavljaju značajan proces u metalurgiji i materijalnoj znanosti. Kada se čelik ohladi ispod kritične temperature za pretvorbu u martenzit, ostaje pothlađeni austenit koji može zadržati stabilnost na nižim temperaturama. Ovaj fenomen ima ključnu ulogu u oblikovanju mikrostrukture čelika te utječe na njegova mehanička svojstva, čime omogućuje prilagodbu materijala različitim zahtjevima i specifičnim primjenama. Razumijevanje pretvorbe pothlađenog austenita važno je za optimizaciju svojstava materijala i razvoj novih inovativnih legura za različite industrije.

### 3.2.1. Tvorba perlita

Kada se čelik ohladi pri temperaturi manjoj od temperature  $A_1$  ( $A_3$  odnosno  $A_{cm}$ ), austenit više nije stabilan i teži pretvaranju u niskotemperaturne faze. Tijekom procesa stvaranja perlitne strukture, austenit se razgrađuje na dva različita sastava: karbid željeza odnosno cementit i ferit. Udio ugljika u feritu iznosi 0,025%, dok u cementitu udio ugljika iznosi 6,67%. Formiranje ove strukture rezultira potpunom difuzijom atoma metala i nemetala, specifično difuzijom atoma ugljika i željeza u nelegiranom čeliku. Kao takvo, formiranje perlitne strukture zahtijeva zadovoljenje dva ključna uvjeta. Prvi uvjet zahtijeva određenu energetska nestabilnost, odnosno značajnu razliku između slobodne energije početnog austenita i završnog perlita. Drugi uvjet je povezan s adekvatnom difuzijom atoma.

Na dijagramu se uočava kako s povećanjem brzine i temperature raste difuzija ugljika i razlika između slobodnih energija.

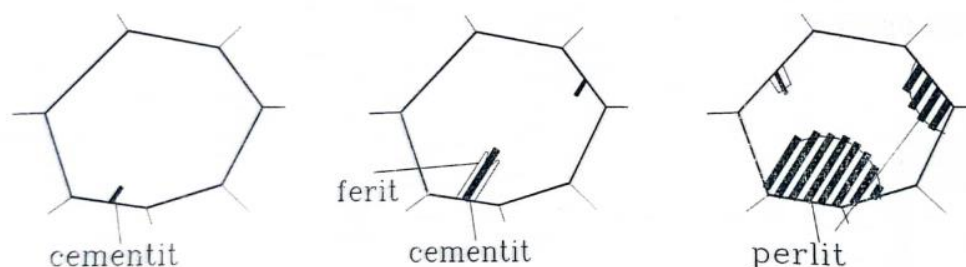


Slika 4.7. Ovisnost brzine i temperature u perlitnoj pretvorbi

Razlika između slobodnih energija perlita i austenita na ravnotežnoj temperaturi  $A_1$  iznosi nula. Raspad austenita moguć je samo između temperature  $A_1$  i  $\vartheta_1$  jer difuzija ugljika nije moguća ispod vrijednosti temperature  $\vartheta_1$  ( $\sim 200^\circ\text{C}$ ). Perlitna pretvorba se u početku brže odvija kako se povećava pothlađenje, zatim postiže svoj maksimum na određenoj vrijednosti pothlađenja nakon čega se smanjuje. Ono je moguće zbog razlike slobode energije koja se povećava, dok se difuzija smanjuje. Pretvorba u međustupanj se odvija između vrijednosti temperatura  $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$  kod većine čelika jer su pri tim temperaturama bolji uvjeti.

Pretvorba se odvija u perlitnom području (temperature između  $A_1$  i  $\vartheta_2$ ), a pojava klica cementita na granici austenitnih zrna predstavlja početak pretvorbe. Rast klica cementita se odvija u smjeru unutarnjih slojeva austenitnog zrna. U okolnom području cementita smanjuje se ugljik i prelazi u ferit koji odlazi u austenitna područja jer je topivost samog ugljika mala. Austenitna područja se pretvaraju u cementit jer to područje postaje prezasićeno ugljikom. Posljedično, perlit se podjednako povećava u sve tri dimenzije.

Slika 4.8. prikazuje perlitnu pretvorbu koja započinje pojavom i rastom klica cementita u perlitnom području. Posljedično, okolina cementita prelazi u ferit. Kao rezultat dolazi do povećanja perlitne strukture. Povećanje pothlađenja rezultira povećanjem potencijalnih novih klica. Također dolazi do smanjenja difuzije ugljika te je nakon pretvorbe perlitna struktura finija. Grubolameralni perlit se stvara pri višim temperaturama te je mekane strukture, dok se pri nižim temperaturama stvara čvršći i tvrdi perlit koji se naziva finolameralni.



Slika 4.8. Shema tvorbe perlita

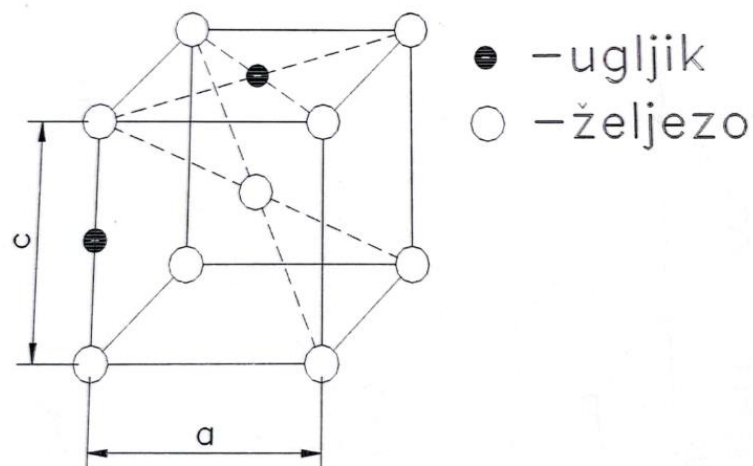
Na brzinu perlitne pretvorbe utječe:

1. stabilnost austenita
2. brzina nicanja nove faze
3. brzina rasta nove faze.

Također, pri određenoj temperaturi utječe kemijski sastav austenita, homogenost i veličina austenitnog zrna te sadržaj karbida (neotopljenih čestica).

### 3.2.2. Pretvorba u martenzit

Martenzit predstavlja čvrstu mješavinu ugljika u  $\alpha$ -željezu s udjelom ugljika koji ne prelazi 2,03%. Kristalna struktura martenzita se razlikuje od one u feritu jer nije kubična, već tetragonalna što se uočava na slici 4.9.



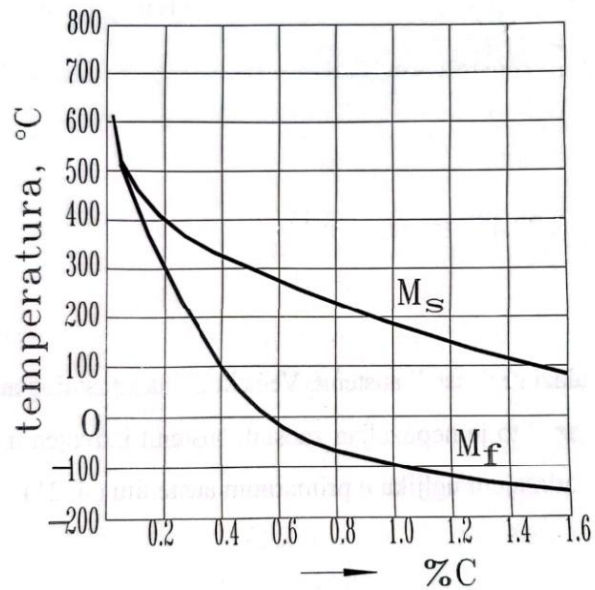
Slika 4.9. Kristalna rešetka martenzita

Atomi ugljika mogu zauzimati različita mjesta u kristalnoj rešetki martenzita te je njihov broj u stvarnosti puno manji. Na primjer, ako udio ugljika u martenzitu iznosi 2%, 4 martenzitne kristalne rešetke će se sastojati samo od jednog atoma ugljika.

Hlađenjem čistog željeza brzinama oko  $600^{\circ}\text{C/s}$  te temperaturama oko  $400^{\circ}\text{C}$  dolazi do transformacije  $\gamma$ -željeza u  $\alpha$ -željezo. Kubična kristalna rešetka  $\gamma$ -željeza je površinski centrirana za razliku od  $\alpha$ -željeza koja je prostorno centrirana. Pretvorba u kojoj se  $\gamma$ -željezo pretvara u  $\alpha$ -željezo pri danim uvjetima naziva se martenzitna pretvorba. Mehanizam transformacije uključuje korake smicanja: atomi unutar kristalne strukture  $\gamma$ -željeza premještaju se duž specifičnih putanja, što rezultira postavljanjem atoma na pozicije karakteristične za kristalnu strukturu  $\alpha$ -željeza. Ovaj proces promjene kristalne strukture događa se gotovo odmah i zahtijeva samo blago smanjenje temperature.

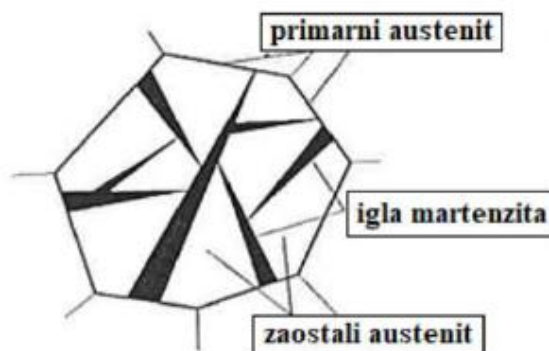
Pri otapanju ugljika u austenitu postiže se stabilizacija  $\gamma$ -područja. Nakon gašenja ostaje određeni dio austenita koji nije doživio transformaciju. No, specifičan dio austenita transformira se u martenzit na nižim temperaturama, koristeći mehanizam smicanja bez potrebe za difuzijom. U procesu martenzitne transformacije, atomi zadržavaju svoje međusobne susjede, a njihov pomikaj je usklađen i ne prelazi polovicu dijagonale kristalne rešetke austenita. Kristali martenzita rastu velikom brzinom koja značajno nadmašuje brzine drugih transformacija u čeliku i kreće se na izuzetno visokim razinama (oko  $5000\text{ m/s}$ ). Martenzitna pretvorba je anizotermička pretvorba što znači da se transformacija materijala odvija pri različitim temperaturama za različite smjerove ili kristalne ravnine.

Temperatura  $M_s$  označava početak martenzitne pretvorbe dok temperatura  $M_f$  označava završetak pretvorbe u martenzit. Temperature početka i završetka martenzitne pretvorbe nisu podložne utjecaju brzine kojom se materijal hladi, što rezultira time da se martenzitna transformacija u čeliku gotovo ne može dodatno sniziti temperaturom hlađenja. Temperature početka i završetka martenzitne pretvorbe su pod utjecajem sadržaja ugljika i prisutnosti legirajućih elemenata što uočavamo na slici 4.10. Utjecaj legirajućih elemenata na temperaturu martenzitne transformacije postaje primjetan isključivo kad su ti elementi rastvoreni unutar strukture austenita.



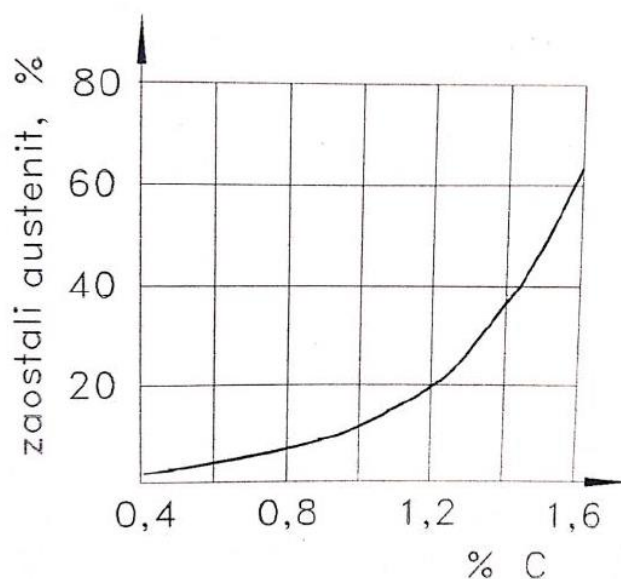
Slika 4.10. Utjecaj udjela ugljika na temperaturu martenzitne pretvorbe

Iz smjere karbida i ferita nije moguće izravni putem dobiti martenzit jer smjesa ima manju slobodnu energiju od martenzita. Martenzitnu strukturu karakteriziraju kristali u obliku pločice igle (igličasta struktura). Matični kristali austenita i martenzita su pravilno orijentirani, stoga martenzitne pločice imaju pravilan položaj. Zaostali martenzit koji se nalazi između iglica nije poželjan i formira se u zasebna zrna. Također, nepoželjna je i veća količina samog zaostalog austenita (slika 4.11.).



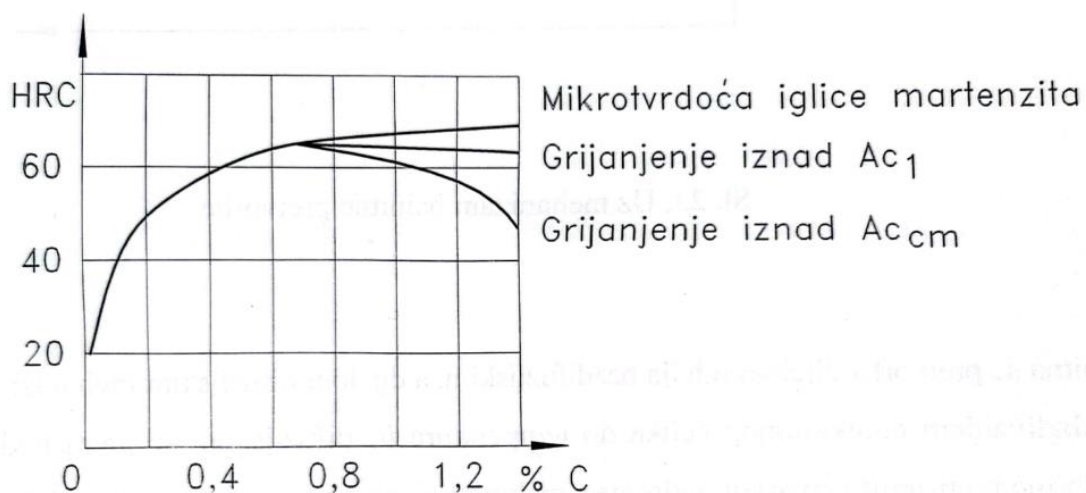
Slika 4.11. Igličasta martenzitna struktura

Posljedično, sa povećanjem udjela ugljika u primarnom austenitu raste i udio zaostalog austenita u martenzitnoj strukturi (slika 4.12.).

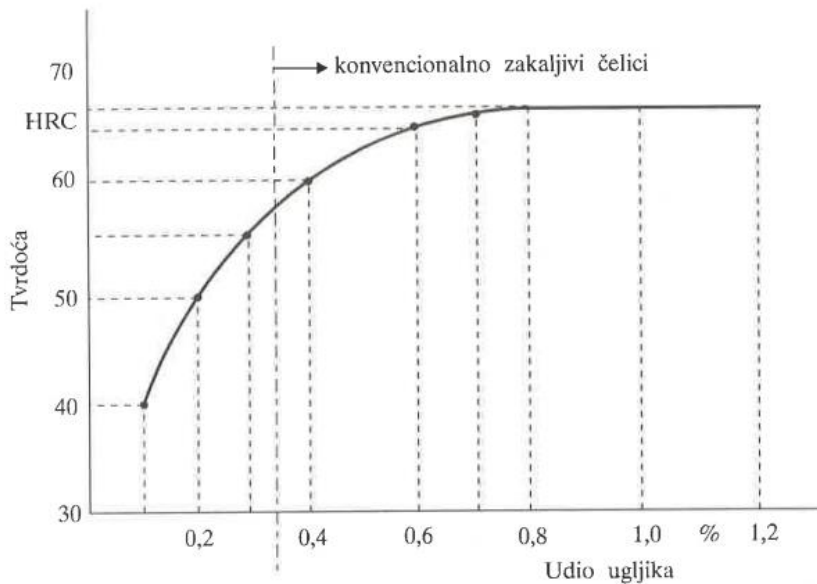


Slika 4.12. Ovisnost udjela ugljika u primarnom austenitu o količini zaostalog austenita

Svojstva tvrdoće martenzita temelje se prvenstveno na varijacijama u koncentraciji ugljika. Povećanjem udjela ugljika, tvrdoća se povećava, no istodobno se smanjuje otpornost na lom. Martenzit s povećanim udjelom ugljika pokazuje iznimnu tvrdoću, ali istodobno je izrazito sklon lomljenju. Taj isti odnos prikazuje i Burnsov dijagram (slika 4.14.).



Slika 4.13. Utjecaj udjela ugljika na tvrdoću martenzita



Slika 4.14. Burnsov dijagram

Burnsov dijagram prikazuje maksimalno postignute tvrdoće kaljenih čelika u ovisnosti o udjelu ugljika u čeliku. Porastom ugljika, tvrdoća ne raste jer daljnjim povećanjem udjela ugljika stvaraju se druge strukture poput austenita i ferita što smanjuje tvrdoću.

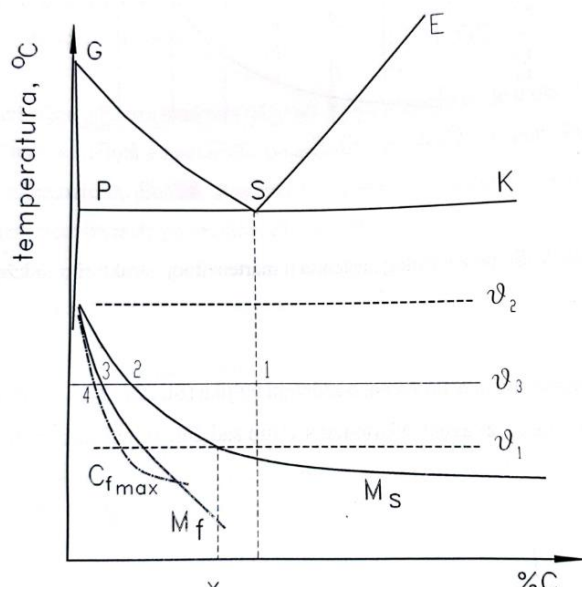
### 3.2.3. Bainitna pretvorba

Bainit je fino zrnata mješavina karbida i prezasićenog ferita. Bainit je međustupan jer se bainitna pretvorba odvija na temperaturama između martenzitne i perlitne pretvorbe ( $\vartheta_1$  i  $\vartheta_2$ ).

Bainitna se pretvorba odvija dvama mehanizmima, difuzijskim i bezdifuzijskim mehanizmom. Difuzijski su procesi intezivnijim pri većim vrijednostima temperature, dok su pri manjim intezivniji bezdifuzijski procesi. Međutim, promjene temperature pretvorbe znatno ne mijenjaju mehanizam bainitne pretvorbe.

Bainitna pretvorba započinje kada se eutektiodni čelik pothladi ispod temperaturene vrijednosti  $\vartheta_3$  pri čemu difuzijom ugljika u nestabilnom austenitu nastaju područja sa visokom odnosno niskom koncentracijom ugljika. Smanjenjem vrijednosti ugljika ispod koncentracije 2, odnosno ispod koncentracije 3 stvaraju se uvjeti za nastanak martenzitne pločice (slika 4.15.).





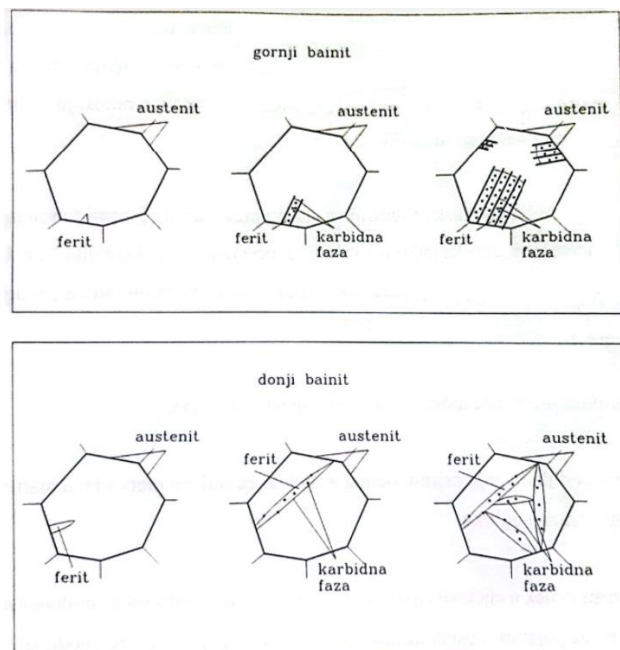
Slika 4.15. Grafički prikaz bainitne pretvorbe

Uvjeti koji moraju biti zadovoljeni kako bi se mogla odvijati bainitna pretvorba uključuju dovoljnu difuziju ugljika i dovoljno sniženje temperature (pothlađivanje) austenita za pretvorbu u martenzit. Ako uvjeti nisu zadovoljeni, u bainitnoj se strukturi pojavljuje zaostali austenit koji je nepoželjan. Na primjer, ako temperatura čelika nakon pothlađivanja ostane iznad temperature  $M_s$  i ispod temperature  $\vartheta_1$ , austenit u potpunosti ostaje u strukturi.

Difuzija ugljika, koja je znatno veća u  $\alpha$ -rešetki nego u  $\gamma$ -rešetki, omogućava izdvajanje ugljika i posljedično oblikovanje karbidnih čestica u feritu koji je prezasićen. Nakon toga se koncentracija ugljika u feritu smanjuje do  $C_{\max}$ , koncentracije maksimalne topivosti ugljika koja se može dobiti bezdifuzijskim mehanizmom pretvaranjem austenita u martenzit (slika 4.15.).

Kada čelik sadrži niske koncentracije ugljika, u bainitnoj pretvorbi prevladava formiranje feritne faze i rezultat je nastanak probainitnog čelika. U suprotnom, ako čelik sadrži veću koncentraciju ugljika prevladavaju procesi karbidne faze i nastanak probainitnog cementita.

Rast feritne faze je omogućen difuzijom ugljika u susjedna austenitna područja. Sloj koji je bogat ugljikom i koji je pogodan za nastanak karbidne pločice se stvara na granici ferita i austenita, a posljedično uzrokuje prekid daljnjeg rasta feritne pločice. Rast karbidne pločice je omogućen difuzijom ugljika iz samog ferita i iz susjednog austenita. Slojevi austenita oko karbidne pločice pokreću formiranje nove feritne faze čime započinje nova bainitna pretvorba i proces se ponavlja (slika 4.16.).

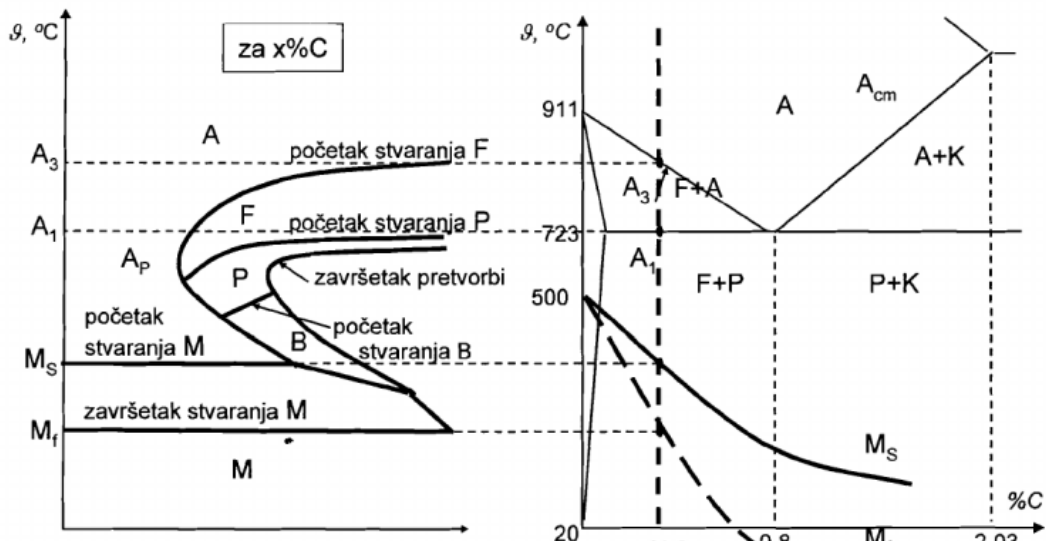


Slika 4.16. Tvorba bainita

Gornji i donji bainit se razlikuju prema svojoj strukturi (slika 18). Na višim temperaturama, od 500 °C do 350 °C, formira se gornji bainit koji smanjuje sposobnost čelika da se oblikuje bez pucanja. Na nižim temperaturama, u rasponu od 350 °C do temperature početka martenzitne pretvorbe ( $M_s$ ), stvara se donji bainit koji ima strukturu sličnu iglama kao martenzit, pružajući čeliku dobru sposobnost za oblikovanje bez lomljenja i zadržavajući otpornost na lomljenje.

### 3.3. TTT-dijagrami

TTT-dijagrami prikazuju dinamiku pretvorbe austenita u druge faze pri ohlađivanju čelika, za različite vrste čelika odnosno za čelik točno određenog kemijskog sastava. TTT označuje vrijeme, temperaturu i pretvorbu (time, temperature, transformation). Pomoću dijagrama je moguće odrediti količinu pretvorenog austenita s obzirom na brzinu i temperaturu hlađenja te vrstu i količinu nastalih faza. Također, koriste se za određivanje vrste hlađenja sa ciljem postizanja odgovarajuće mikrostrukture i faznog sastava pogodnog za određena svojstva čelika. Izrađuju se u laboratorijskim uvjetima različitima od uvjeta toplinske obrade realnog predmeta, a sam je uzorak znatno manji od realnog predmeta.



Slika 4.17. Konstrukcija TTT dijagrama

Raspad austenita se odvija na dva načina:

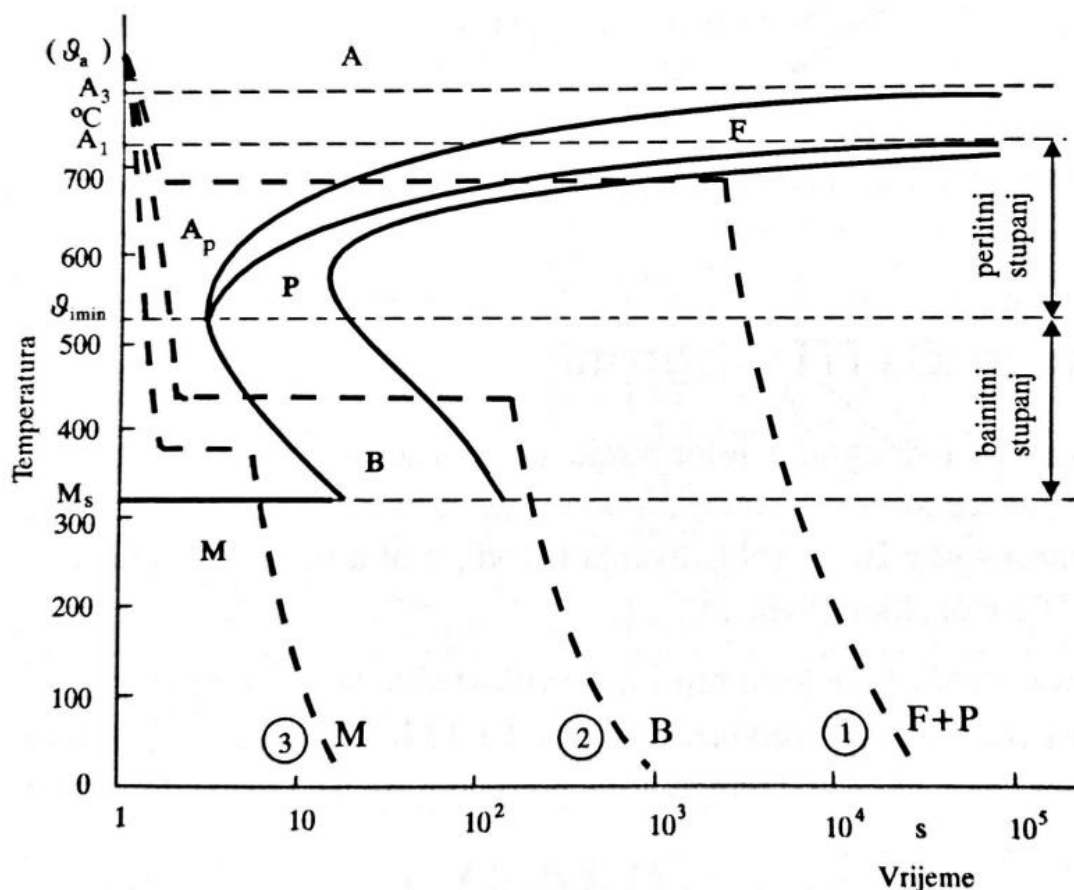
1. pri kontinuiranim uvjetima (temperatura kontinuirana za vrijeme pretvorbe)
2. pri izotermičkim uvjetima (jedna konstantna temperatura).

S obzirom na način raspada austenita razlikuju se TTT-dijagrami za izotermičku pretvorbu i TTT-dijagrami za kontinuirano ohlađivanje.

Za uvjete izotermičke transformacije, TTT-dijagrami koriste se za prikazivanje vremena potrebnog za početak i završetak pretvorbe pri određenim temperaturama. Dogovorom je prihvaćeno da vrijeme do početka pretvorbe predstavlja period kada je transformirano 1% austenita, dok vrijeme do završetka pretvorbe označava trenutak kada je transformirano 99% austenita. Početno vrijeme pretvorbe se naziva inkubacijskim vremenom. TTT-dijagrami vizualno označavaju područja formiranja različitih struktura, tvrdoću i udjel struktura u postotcima. Dodatno, unose se informacije o vremenu i temperaturi austenitizacije, kao i temperaturi početka martenzitne transformacije ( $M_s$ ).

Kod TTT-dijagrama za izotermičko ohlađivanje moguće je utvrditi vremenske okvire početka i završetka pretvorbe na specifičnoj temperaturi, kao i dobiti osnovne karakteristike slitina (kao što su struktura i tvrdoća) nakon provedene transformacije.

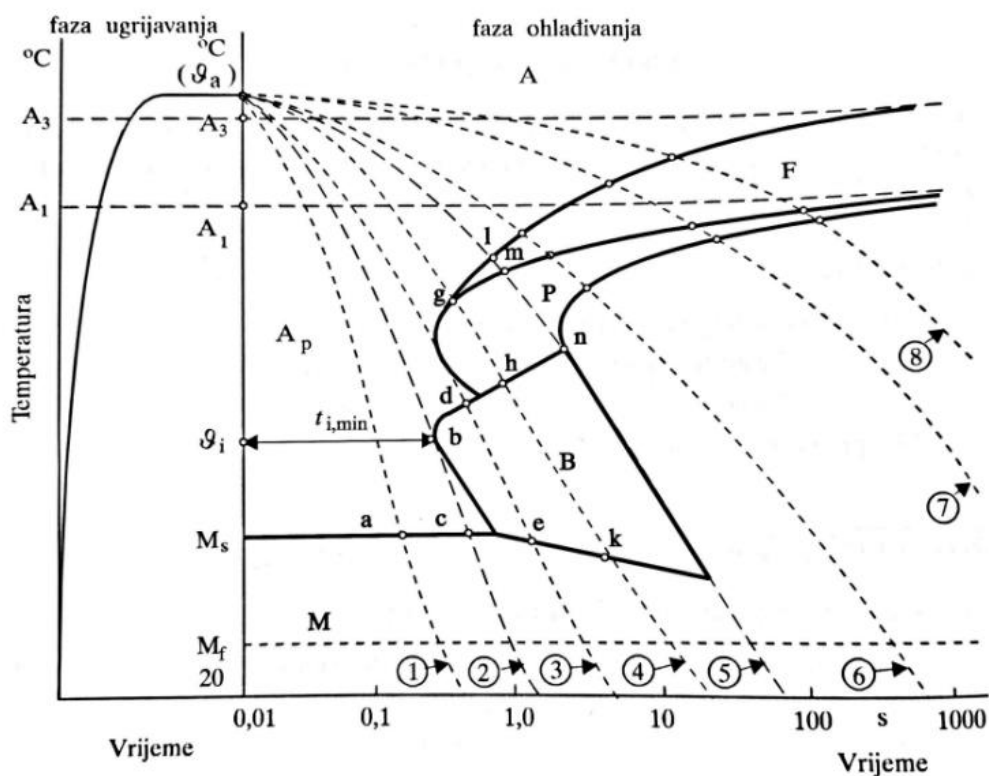
Na slici 20 uočavaju se tri crtkane krivulje označene brojevima 1, 2 i 3. Krivulja 1 predstavlja izotermičko žarenje, krivulja 2 izotermičko poboljšavanje (austembering) dok krivulja 3 prikazuje gašenje u toploj kupki odnosno martembering.



Slika 4.18. TTT-dijagram za izotermičko ohlađivanje

Kod TTT-dijagrama za kontinuirano ohlađivanje dolazi do promjene uvjeta, točnije dolazi do promjene temperature pri kojoj se raspada austenit. Pri kontinuiranom ohlađivanju struktura se sastoji od niskotemperaturnog i visokotemperaturnog raspada austenita, odnosno nije jednolična. TTT-dijagramima za kontinuirano ohlađivanje prikazano je vrijeme početka i vrijeme kraja pretvorbe za različite brzine ohlađivanja. TTT-dijagram pri kontinuiranom ohlađivanju zahtjeva krivulju ohlađivanja za razliku od TTT-dijagrama za izotermičke pretvorbe. Dijagram omogućuje određivanje točnog vremena početka i kraja pretvorbe za određenu brzinu ohlađivanja. Također, omogućuje određivanje strukture i tvrdoće slitine nakon ohlađivanja. Kako bi se austenit pretvorio u martenzit, obično zahtijeva brzo hlađenje čelika s visokih temperatura austenitnog područja na temperaturu na kojoj se formira martenzit. Ovaj nagli pad temperature obično rezultira povećanim unutarnjim naprezanjima i deformacijama u materijalu.

Ako je cilj postići mikrostrukturu martenzita, posebno je važno poznavati minimalnu brzinu ohlađivanja potrebnu da se austenit potpuno pretvori u martenzit. Ova minimalna brzina ohlađivanja poznata je kao gornja kritična brzina gašenja. Gornja kritična brzina gašenja prikazana je krivuljom koja tangira krivulju koja označuje početak pretvorbe u perlit ili bainit. Gornja kritična brzina gašenja prikazana je brojem 2 (slika 4.19.). U situacijama gdje se želi izbjeći formiranje strukture martenzita, donja kritična brzina gašenja ima značajnu ulogu. Ova brzina predstavlja maksimalno dopušteno ubrzanje hlađenja pri kojem se još uvijek ne stvara martenzitna struktura. Donja kritična brzina gašenja prikazana je brojem 5 (slika 4.19.). Krivulja 1 označava početak pretvorbe pothlađenog austenita u martenzit. Do te krivulje austenit je pothlađen. Prateći krivulju 3 od točke d do točke e odvija se pretvorba pothlađenog austenita u bainit, a nakon točke e počinje pretvorba u martenzit koja traje do temperature  $M_f$ . Tvorbba perlita započinje u točki g koja se nalazi na krivulji 4. Tvorbba perlita traje do točke h gdje od preostalog austenita započinje stvaranje bainitne strukture. Na slici se mogu uočiti i krivulje ohlađivanja 6, 7 i 8 koje označavaju potkritične krivulje ohlađivanja.



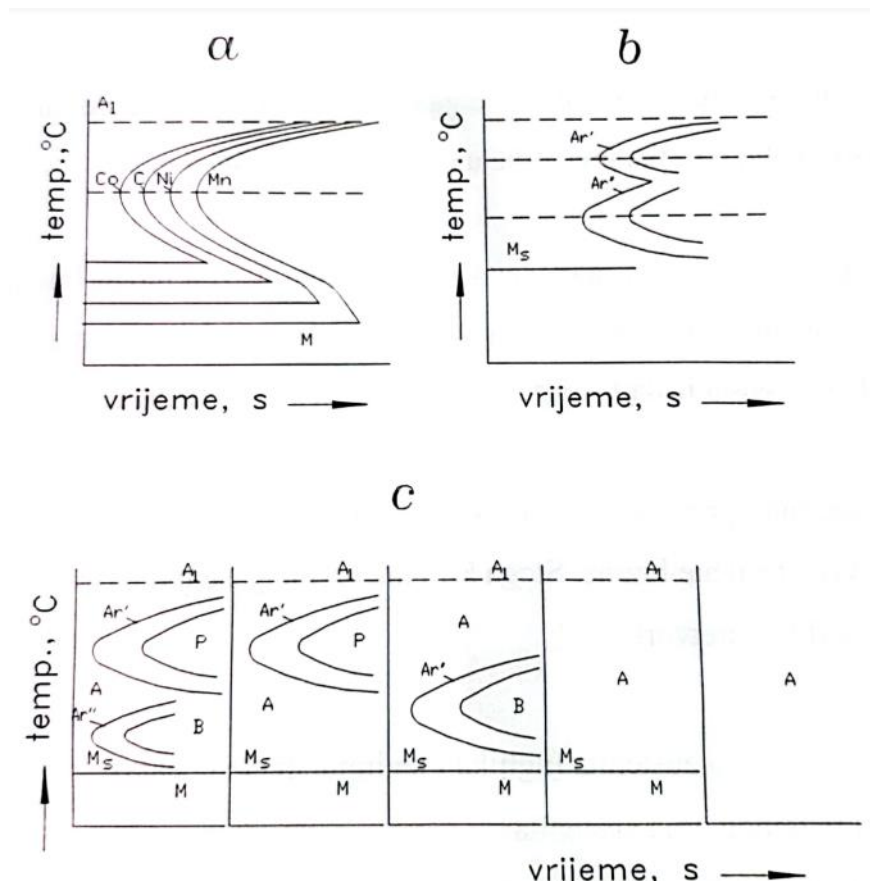
Slika 4.19. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje

Brzina perlitne pretvorbe utječe na kritičnu brzinu gašenja. Veće će biti kritične brzine ako je i veća brzina perlitne pretvorbe. Stoga, čimbenici koji utječu na kritičnu brzinu gašenja jednaki su onima koji utječu na perlitnu pretvorbu:

1. kemijski sastav austenita (legirajućih elemenata i ugljika)
2. homogenost austenitnog zrna
3. veličina zrna kristala austenita
4. sadržaj karbida (neotopljenih čestica).

Termodinamički se odnosi mijenjaju kada dođe do promjene kemijskog sastava čelika, a posljedično dolazi i do promjene difuzije ugljika i drugih elemenata u čeličnoj strukturi. Dodavanjem legirajućih elemenata u čelik, u TTT-dijagramima dolazi do promjene veličine i položaja različitih strukturnih područja. Oni mijenjaju difuzijske procese usporavajući ih. Kao primjer mogu se navesti TTT-dijagrami eutektoidnog čelika koji pri višim temperaturama sadržavaju samo područje pretvorbe austenita u perlit. Nadalje, TTT-dijagrami nadeutektoidnog sastava sadržavaju područje pretvorbe austenita u perlit i austenita u sekundarni cementit te TTT-dijagrami podeutektoidnog čelika koji pri višim temperaturama imaju područje pretvorbe austenita u perlit i austenita u ferit.

Većina legirajućih elemenata, u koje se ubraja i ugljik, utječe na difuzijske procese na način da u TTT-dijagramima pomiču krivulju difuzijske pretvorbe u desno dok prema dolje pomiču temperaturu  $M_f$  i  $M_s$ . Suprotno, kobalt pomiče krivulju difuzijske pretvorbe prema gore (slika 4.20a). Utjecaj legirajućih elemenata na krivulju difuzijske pretvorbe na TTT-dijagramima je vidljiv na slici 4.20.



Slika 4.20. Utjecaj legirajućih elemenata na TTT-dijagrame

Difuzijski se procesi kod čelika koji sadrže veći udio ugljika i legirajućih elemenata usporavaju te se prema dolje pomiču temperature martenzitne pretvorbe. Stabilnost pothlađenog austenita unutar čelika je veća, a pojavljuju se i područja veće stabilnosti austenita između baintine i perlitne pretvorbe što je vidljivo razdvajanjem temepraturnih intervala baintne i perlitne pretvorbe na slici 4.20b.

Zaključno, dodavanjem legirajućih elemenata i njihovim djelovanjem mijenja se brzina pretvorbe što rezultira nestankom određenih područja pretvorbe što se može vidjeti na TTT-dijagramima prikazanim na slici 4.20c..

## 5. KALJIVOST

Kaljivost se sastoji od dvije komponente koje se definiraju i promatraju odvojeno:

1. zakaljivost
2. prokaljivost.

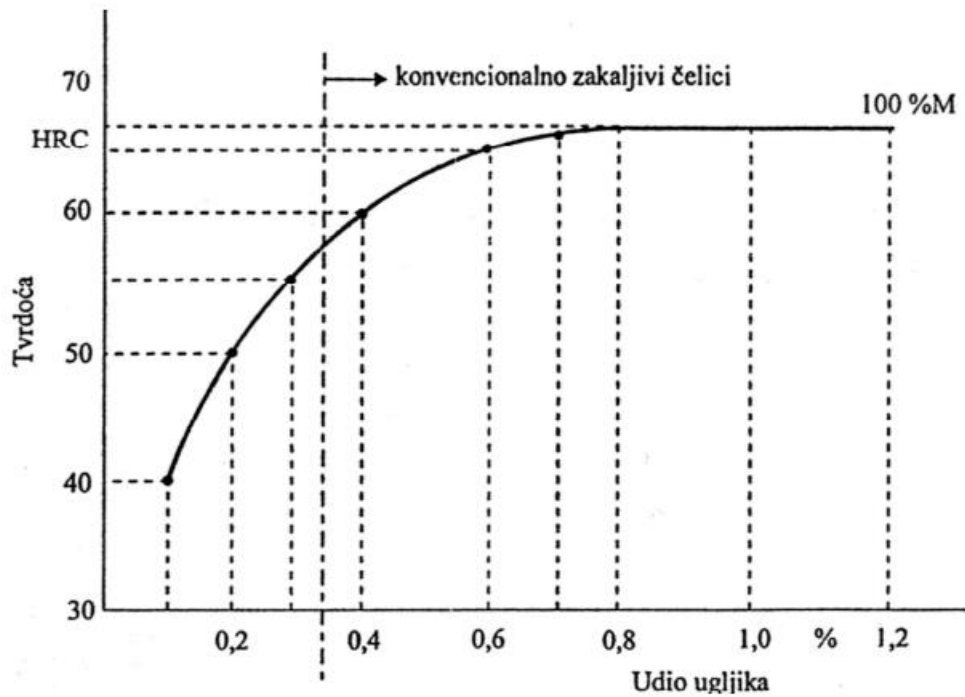
Kaljivost čelika se definira kao svojstvo čelika koje, kao posljedica gašenja s temperature austenitizacije:

1. postigne veću tvrdoću na površini – zakali
2. postigne ujednačeniju tvrdoću na poprečnom presjeku – prokali.

### 5.1. Zakaljivost

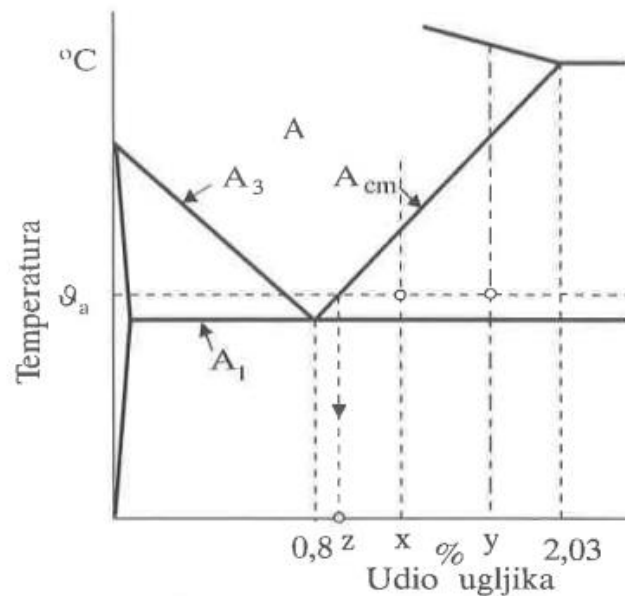
Zakaljivost označava sposobnost čelika da postigne maksimalnu tvrdoću na površini, nakon što je brzo ohlađen s određene temperature, primjenjujući kritičnu ili veću brzinu hlađenja. Za čelike se općenito smatra da su zakaljivi ako sadrže više od 0,25% C, jer su kritične brzine hlađenja kod čelika s manje od 0,25% C izrazito visoke, što zahtijeva posebnu opremu i visoke troškove u praktičnoj primjeni. S obzirom na želju za postizanjem čvrste, uglavnom martenzitne strukture i uzimajući u obzir da je tvrdoća martenzitne strukture vezana uz udio ugljika, zakaljivost čelika direktno će biti uvjetovana specifičnim udjelom ugljika prisutnim u samom materijalu. Što je veći udio ugljika u procesu to je bolja zakaljivost. Burnsovim dijagramom je prikazana ovisnost maksimalne tvrdoće o udjelu ugljika.





Slika 5.1. Burnsov dijagram

Horizontalni smjer Burnsove krivulje može se objasniti na sljedeći način: kako udio ugljika raste u čeliku, udio preostalog austenita također raste. Preostali austenit je manje tvrd od martenzita te stoga utječe na ukupnu tvrdoću čelika, čineći je manje osjetljivom na promjene sadržaja ugljika. Porastom ugljika, tvrdoća ne raste jer sa daljnjim povećanjem udjela ugljika stvaraju se druge strukture poput austenita i ferita što smanjuje tvrdoću.



Slika 5.2. Koncentracija ugljika u austenitu nakon austenitiziranja nadeutektoidnog čelika različitih udjela ugljika ( $x$  i  $y$ )

Zaključno, tvrdoća potpuno zakaljenog čelika ovisi o dva čimbenika:

1. intezitetu gašenja (potrebno je gasiti iznad kritične razine zbog postizanja zadovoljavajuće odnosno maksimalne tvrdoće)
2. udjelu ugljika otopljenog u primarnom austenitu na određenoj temperaturi austenitizacije.

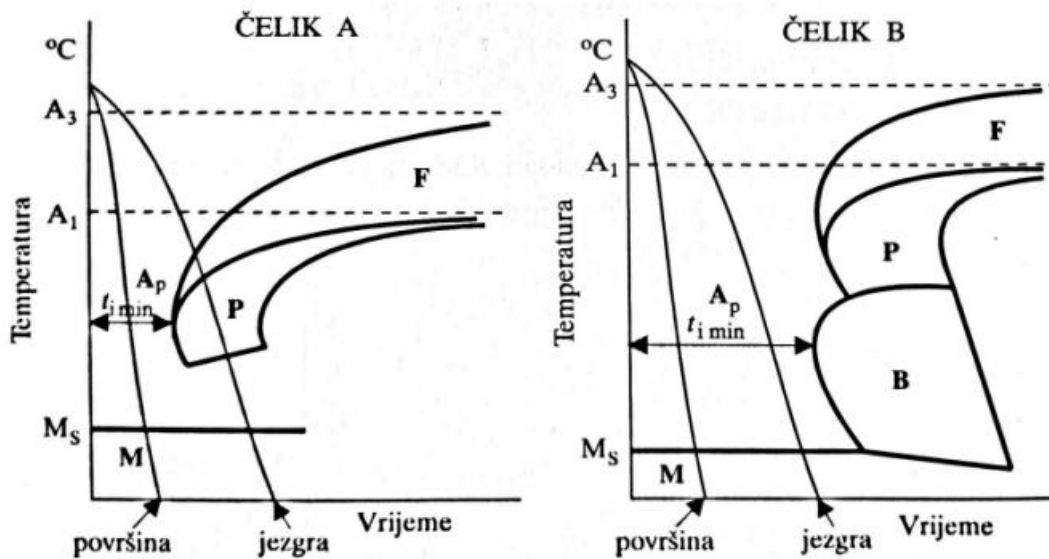
## 5.2. Prokaljivost

Prokaljivost je svojstvo čelika koje omogućuje stvaranje martenzitne strukture duboko unutar čelika tijekom naglog hlađenja. Ovo se provodi kako bi se postigla ravnomjerna tvrdoća po presjeku nakon kaljenja. U istim uvjetima kaljenja, čelici s većom prokaljivošću lakše razvijaju dublju martenzitnu strukturu u usporedbi s čelicima s manjom prokaljivošću. Prokaljivost je prvenstveno povezana s gornjom kritičnom brzinom gašenja koja, pak, ovisi o brzini perlitne transformacije u čeliku. Osim gornje kritične brzine gašenja, sadržaj ugljika i legirajući elementi, vodljivost topline čelika ima manji utjecaj na prokaljivost i rijetko se mijenja promjenom kemijskog sastava.

Pri naglom gašenju čelika, brzina hlađenja varira ovisno o mediju u kojem se odvija hlađenje. Brzina hlađenja se smanjuje u sljedećem redoslijedu:

1. slana voda
2. obična voda na sobnoj temperaturi
3. topla voda
4. ulje
5. komprimirani zrak
6. miran zrak [4].

Ako se želi poboljšati prokaljivost određenog čelika, preporučljivo je da komad koji se kalio bude što manjih dimenzija. Usporedba dva čelika jednake veličine promjera, ali različitih svojstava (slika 5.3.). Na temelju dijagrama na slici 5.3, jasno je kako će čelik s dužim inkubacijskim periodom prehladnog austenita pokazivati bolju prokaljivost.



Slika 5.3. TTT-dijagrami kontinuiranog ohlađivanja dvaju različitih čelika

Prokaljivost čelika igra ključnu ulogu u postizanju željenih svojstava materijala nakon procesa kaljenja. Odabir pravog hlađenja, veličine komada i poznavanje karakteristika austenita inkubacije doprinose uspješnom postizanju optimalne prokaljivosti. Razumijevanje ovog koncepta omogućuje inženjerima da prilagode postupke termičke obrade kako bi ostvarili željene mikrostrukture i mehanička svojstva u materijalima, doprinoseći njihovoj primjeni u različitim inženjerskim situacijama.

## 6. PROCJENA PROKALJIVOSTI

Prokaljivost se eksperimentalno utvrđuje putem testiranja kaljenja uzoraka čelika različitih promjera, koristeći različite metode hlađenja i različite intenzitete gašenja. Intenzitet gašenja prvenstveno je ovisan o vrsti hlađenog medija, brzini strujanja te temperaturi medija. Nakon procesa kaljenja, uzorci se režu kako bi se dobili poprečni presjeci na kojima se provode mjerenja tvrdoće.

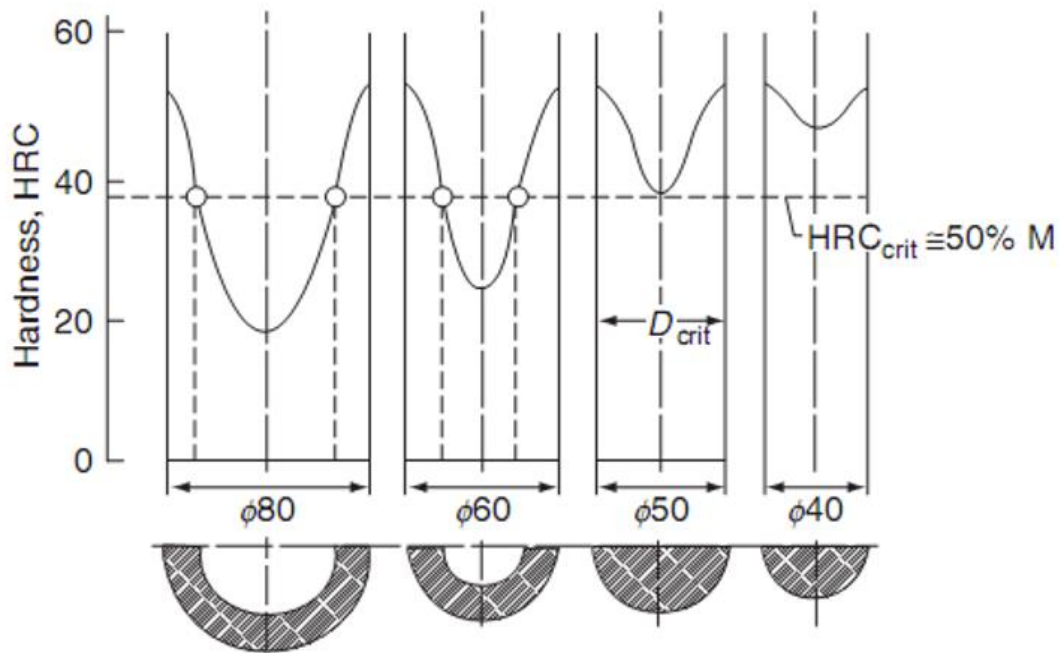
Metoda za procjenu prokaljivosti uključuje korištenje TTT-dijagrama. Kako bi se smanjili troškovi, TTT-dijagrami se izrađuju za specifičan kemijski sastav određenog tipa čelika i za određenu temperaturu austenitizacije.

No, utvrđivanje prokaljivosti se ne oslanja na TTT-dijagrame zbog njihove zahtjevne prirode i visokih troškova. Kako bi se procijenila prokaljivost čelika, razvijene su raznovrsne metode koje se koriste u svrhu ispitivanja ovog svojstva. Najpoznatije metode za ispitivanje procjene prokaljivosti su Grossmannova metoda, Jominyjeva metoda i Crafts-Lamont metoda.

### 6.1. Grossmannova metoda

Ispitivanje sposobnosti čelika da se stvrdne na određenu dubinu provodi se primjenom Grossmanove metode na različitim čeličnim uzorcima različitih promjera. U ovom postupku koristi se određeni rashladni medij za kaljenje. Cilj je utvrditi koliko duboko čelik može biti stvrdnut.

Osnovna mjera prokaljivosti prema ovoj metodi je postotak martenzita prisutnog u strukturi čelika. Specifičnost ove strukture leži u činjenici da na krivuljama promjene tvrdoće prema poprečnom presjeku postoji naglo povećanje tvrdoće upravo na 50% martenzita što možemo vidjeti na slici 6.1.



Slika 6.1. Određivanje kritičnog promjera  $D_k$  prema Grossman-u

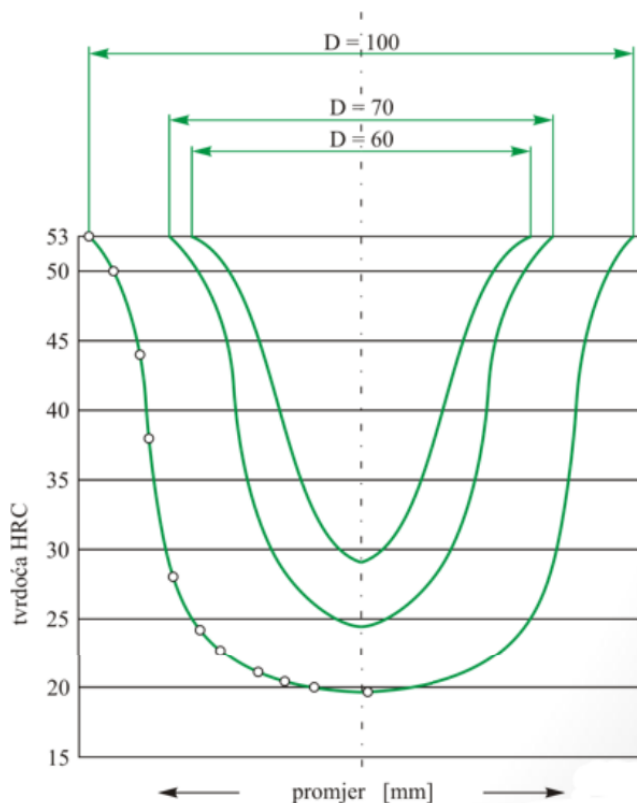
Za određeni čelik, tvrdoća koja se postiže kada je 50% martenzita prisutno naziva se kritična tvrdoća  $HRC_k$ . Kako bismo procijenili prokaljivost, koristi se kritični promjer  $D_k$ , što je promjer koji osigurava da nakon kaljenja nema "nezakaljenog" dijela unutar epruvete, tj. dio s manje od 50% martenzita.

No, ovaj pristup ima svoje ograničenje jer ovisi o specifičnim uvjetima hlađenja. Da bismo definirali kritični promjer neovisno o intenzitetu rashladnog medija, uveli smo teoretski pojam idealnog kritičnog promjera  $D_i$ .

Idealni kritični promjer  $D_i$  je precizno definiran promjer koji rezultira strukturom s 50% martenzita u središtu čelika kada se kaljenje izvodi u idealnom rashladnom mediju. Idealno rashladno sredstvo je ono koje ima faktor intenziteta hlađenja  $H = \infty$ , što znači da se površinska temperatura austenitiziranog čelika trenutačno smanjuje na temperaturu rashladnog medija bez ikakvog vremenskog odgađanja. Drugim riječima, idealni kritični promjer  $D_i$  je pokazatelj prokaljivosti čelika koji ne ovisi o konkretnom rashladnom sredstvu. S njim možemo odrediti kritični promjer  $D_k$  za bilo koje stvarno rashladno sredstvo, odnosno njegov intenzitet rashladnog medija  $H$ .

Pojednostavljeno rečeno, zamislimo da imamo nekoliko epruveta različitih veličina i oblika. Nakon što su prolazile kroz proces zagrijavanja i brzog hlađenja, moramo ih prerežati na poprečnom presjeku. Bitno je odabrati epruvete takvih promjera da u presjeku dobijemo dio koji je stvrdnut s više od 50% martenzita i dio koji nije stvrdnut s manje od 50% martenzita. Da bismo osigurali da točno vidimo strukturu, moramo rezati uz intenzivno hlađenje kako toplina ne bi utjecala na promjenu strukture.

Sada dolazi ključni dio: epruveta koja ima kritični promjer  $D_k$  ima strukturu sa 50% martenzita u središtu presjeka. Manje epruvete od kritičnog promjera ( $D < D_k$ ) imaju veći postotak martenzita u središtu i, posljedično, veću tvrdoću. S druge strane, veće epruvete od kritičnog promjera ( $D > D_k$ ) imaju više od 50% martenzita samo na površini do određene dubine. Nakon što se epruvete prerežu, obrade brušenjem i izmjere tvrdoću na poprečnom presjeku, dobijemo "U krivulje" kao što je prikazano na slici 6.2. Ove krivulje pomažu nam razumjeti i analizirati svojstva materijala i kako se mijenjaju s različitim promjerima epruveta.

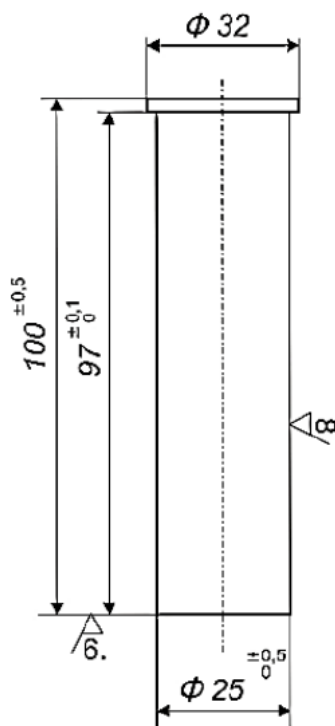


Slika 6.2. "U" krivulje za čelike različitih promjera

Zaključno Grossmanova metoda je korisna tehnika za procjenu prokaljivosti čelika putem rezanja i analize epruveta različitih promjera nakon procesa kaljenja. Kritični promjer  $D_k$  igra ključnu ulogu u određivanju postotka martenzita u središtu epruvete. Ova metoda omogućuje bolje razumijevanje i karakterizaciju svojstava čelika te pomaže inženjerima i znanstvenicima u optimizaciji procesa kaljenja i razvoju materijala.

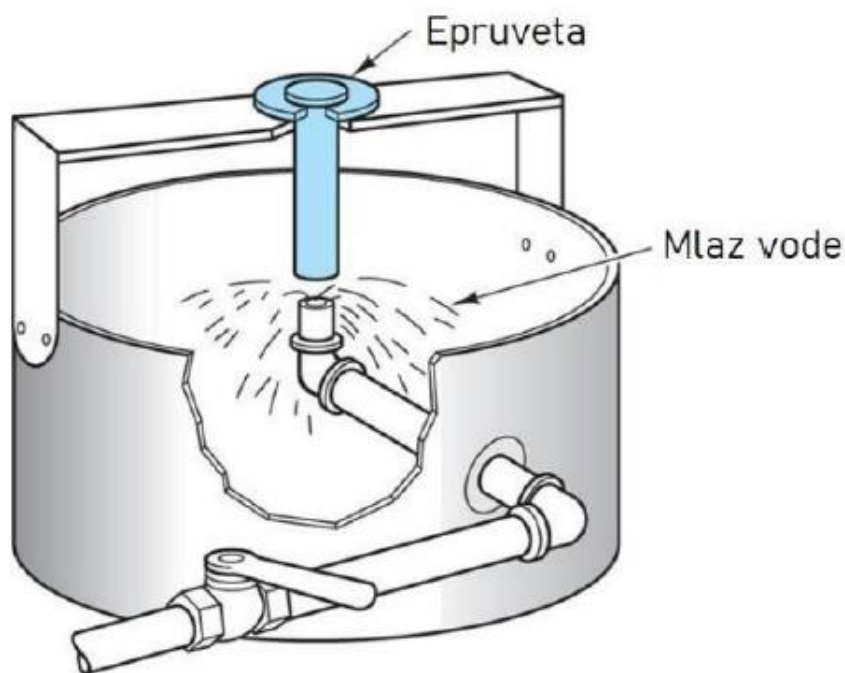
## 6.2. Jominyeva metoda

Jominyeva metoda za procjenu prokaljivosti čelika, zbog svoje praktičnosti i relativno niskih troškova, često se primjenjuje i smatra se ključnom tehnikom za ocjenu prokaljivosti čelika. Ova metoda temelji se na procesu hlađenja uzorka, obično u obliku šipke, koristeći mlaz vode s temperature austenitizacije. Hlađenje se provodi tako da je mlaz vode usmjeren prema jednom kraju uzorka, odnosno čeonj strani epruvete. Standardizirani uzorak za ovu svrhu obično je šipkastog oblika, potpuno glatke površine, s duljinom od 100 mm i promjerom od 25 mm.



Slika 6.3. Standardizirani uzorak za Jominy pokus

Epruveta se stavlja u peć koja mora biti sposobna zagrijati epruvetu na određenu temperaturu austenitizacije  $\vartheta_A$  u roku od 40 minuta, uz preciznost održavanja te temperature unutar  $\pm 5$  °C. Bitno je da epruvetu možemo jednostavno izvaditi iz peći. Poželjno je da peć ima zaštitnu atmosferu, ali ako to nije moguće, može se koristiti zaštitna kutija s dodatkom materijala koji sadrži ugljen, kao što su grafitni prah, grafitna ploča ili sloj strugotina od sivog lijeva na dnu kutije. Ako je peć već prethodno zagrijana na temperaturu austenitizacije, zagrijavanje epruvete će trajati samo 30 minuta. Nakon što se epruveta zagrije, treba je izvaditi iz peći i postaviti u uređaj za gašenje. Ovaj uređaj sastoji se od nosača za epruvetu i mlaznice za vodu koja se postavlja iznad epruvete tako da su usklađene vertikalno. Razmak između mlaznice i epruvete mora biti jednak promjeru mlaznice, a to iznosi  $12,5 \pm 1$  mm. Da bi se postigao vertikalni mlaz vode prema epruveti, koristi se hidrostatski tlak, a visina mlaza treba biti  $65 \pm 5$  mm. Visinu mlaza prati se vizualno pomoću kontrolnih točaka za visinu mlaza koje su dio uređaja za gašenje. Temperatura vode koja se koristi za mlaz iznosi između 5 i 30 °C, i tokom 15 minuta mlaz udara u glatku čeonu stranu epruvete te se raspršuje u obliku otvorenog kišobrana.



*Slika 6.4. Hlađenje epruvete udarom mlaza vode o glatko čelo*

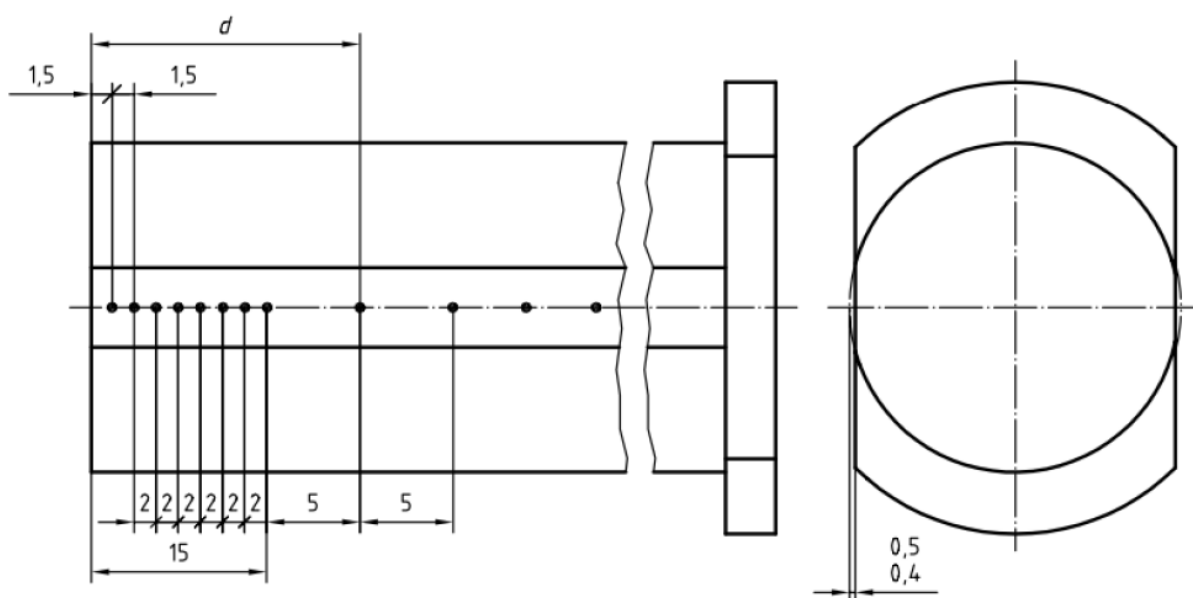


Nakon što epruveta bude ohlađena, pažljivo brusimo dvije suprotne i paralelne ravne površine na dubinu od 0,4 mm. Brušenje mora biti iznimno pažljivo kako bismo izbjegli moguće promjene u strukturi materijala zbog zagrijavanja koje se događa tijekom brušenja.

Jedna od izbrušenih površina koristi se kao referentna točka i pričvršćuje se u uređaj za držanje epruvete koji ima mehanizam za pomicanje. Druga izbrušena površina služi za mjerenje tvrdoće materijala.

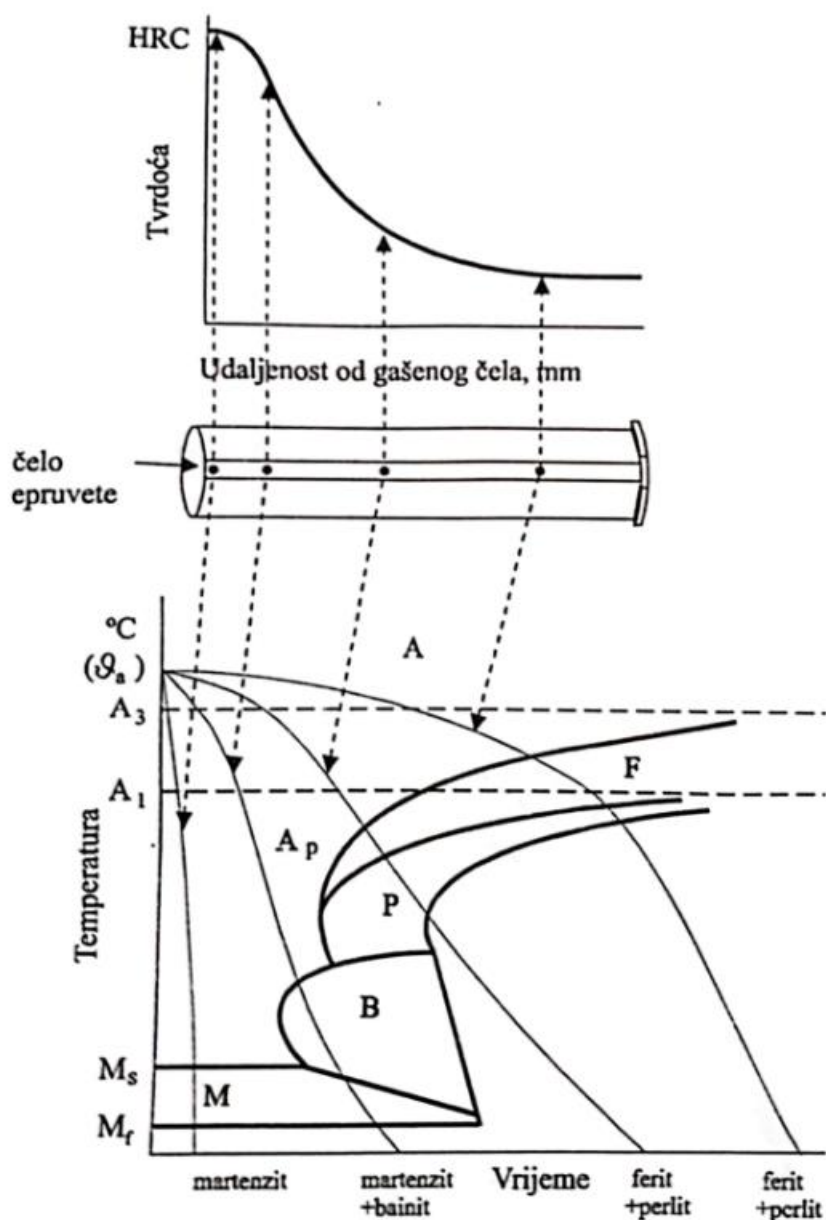
Nakon što je epruveta postavljena u uređaj za držanje epruvete, zajedno s uređajem, postavlja se u uređaj za ispitivanje tvrdoće. Ispitivanje tvrdoće može se izvoditi prema Vickersovoj (HV) metodi ili češće prema Rockwellovoj (HRC) metodi.

Sama procedura ispitivanja tvrdoće provodi se tako da prvo mjerimo tvrdoću na udaljenosti od 1,5 mm od brusne površine, zatim na 3 mm udaljenosti, i tako dalje, svakih 2 mm do udaljenosti od 15 mm od brusne površine epruvete. Nakon što se dosegne ta udaljenost od 15 mm, tvrdoća se ispituje svakih 5 mm duž središnjice izbrušene površine (6.5.).



*Slika 6.5. Ispitivanje tvrdoće*

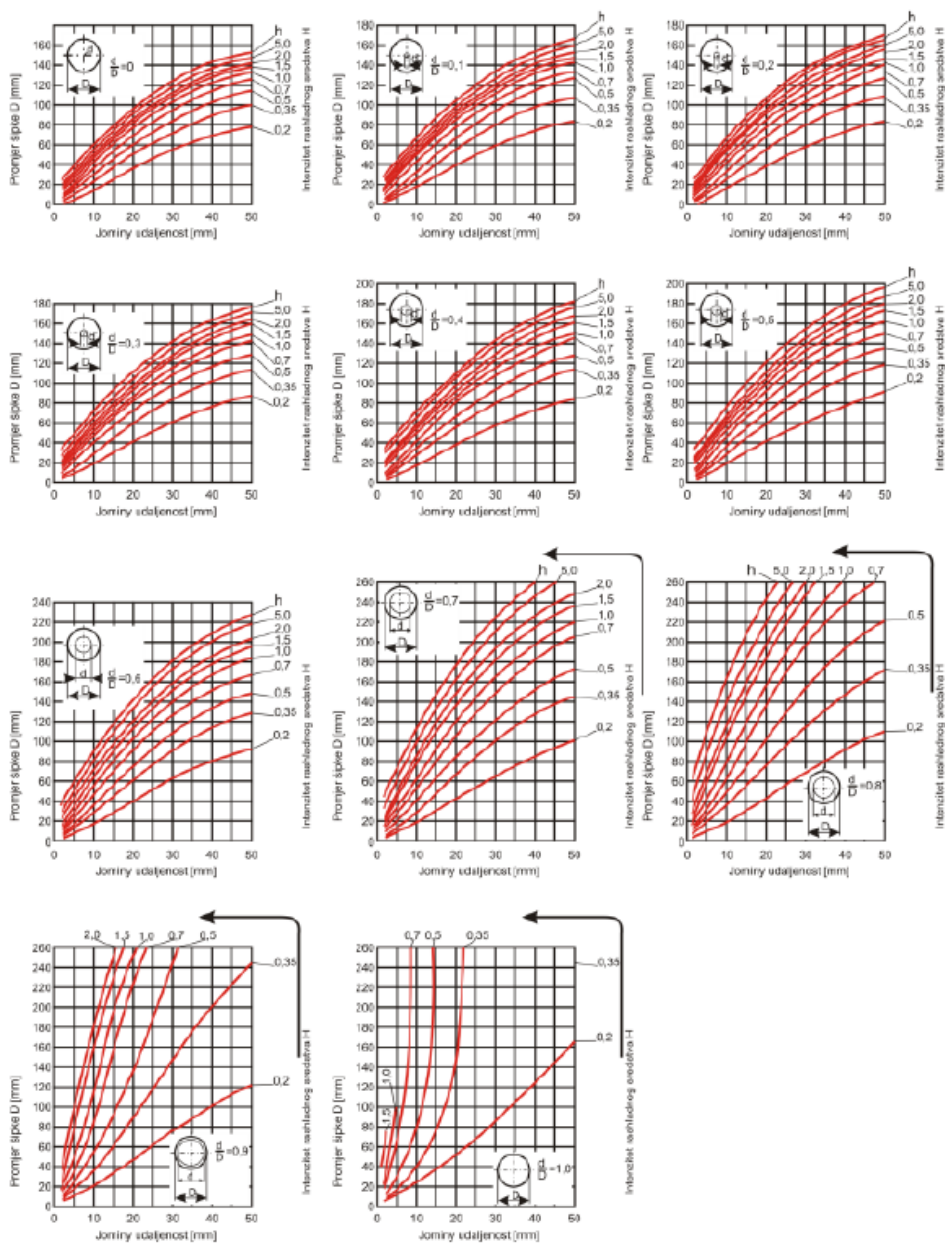
Rezultati koje dobijemo, odnosno izmjerene tvrdoće, koriste se za stvaranje Jominyeve krivulje koja je prikazana na slici 6.6. Jominyeva krivulja je graf koji vizualno prikazuje kako se tvrdoća materijala mijenja s udaljenošću od gašenog čela epruvete. Ovaj graf nam pomaže u određivanju prokaljivosti uzorka. Kako mlaz vode direktno hladi čelo epruvete, taj dio se stvrdnjava najbrže, brže nego što je kritično potrebno. To rezultira martenzitnom strukturom koja ima najveću tvrdoću. Kako se udaljavamo od čela epruvete, slojevi materijala se sve sporije hlade, što rezultira strukturom s manje martenzita i time nižom tvrdoćom.



Slika 6.6. Krivulje ohlađivanja Jominyjeve epruvete prikazane u TTT-dijagramu

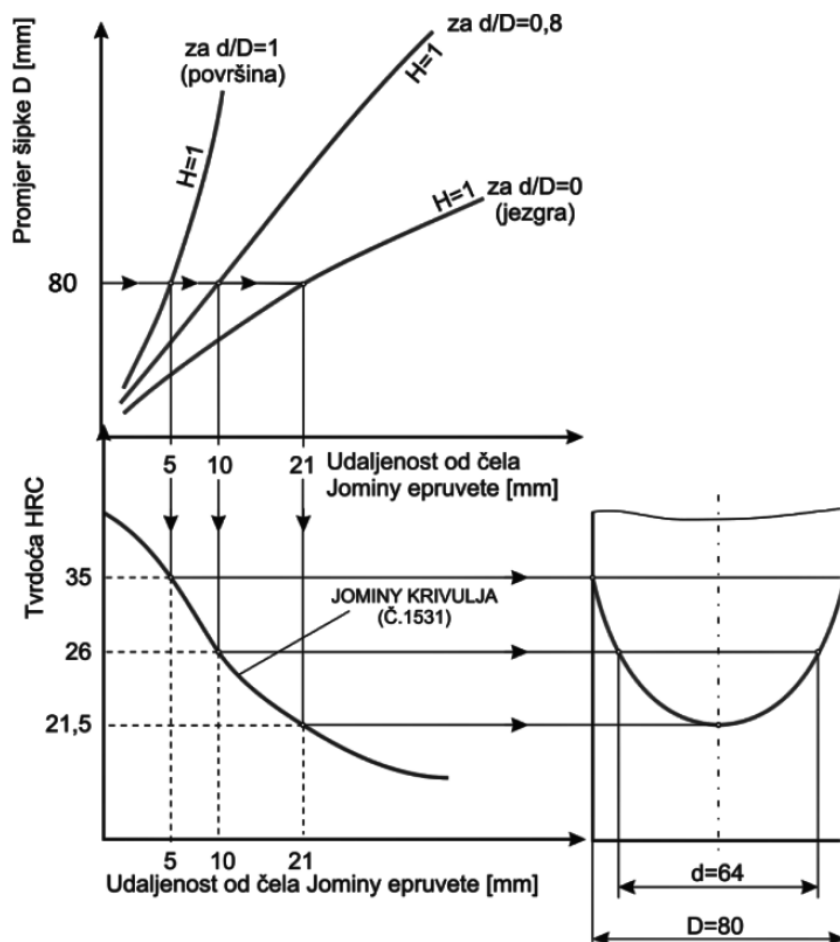
### 6.3. Crafs-Lamont metoda

Crafts-Lamont metoda se primjenjuje na izratke s kružnim poprečnim presjecima i temelji se na 11 dijagrama (slika 6.7). Svaki dijagram odgovara određenoj udaljenosti od površine izratka i različitim intenzitetima gašenja  $H$ . Svakom pojedinom dijagramu pridružen je odgovarajući omjer  $d/D$ , gdje  $d$  predstavlja promjer na kojem želimo mjeriti tvrdoću, a  $D$  predstavlja vanjski promjer šipke. Na primjer, za određivanje tvrdoće u središtu presjeka uzorka koristi se omjer  $d/D = 0$ , dok za mjerenje tvrdoće na površini uzorka koristi se omjer  $d/D = 1$ . Ovi dijagrami i omjeri omogućuju precizno mjerenje tvrdoće na različitim dubinama unutar presjeka zakaljenog materijala.



Slika 6.7.. Crafs-Lamontovi dijagrami

Da bismo dobili traženu krivulju tvrdoće, poznatu kao U-krivulja, koristimo kombinaciju informacija iz Jominyeve krivulje i Crafts-Lamont dijagrama. Ovaj postupak ilustriran je na slici 6.9, gdje se prikazuje kako se U-krivulja stvara iz ovih podataka.

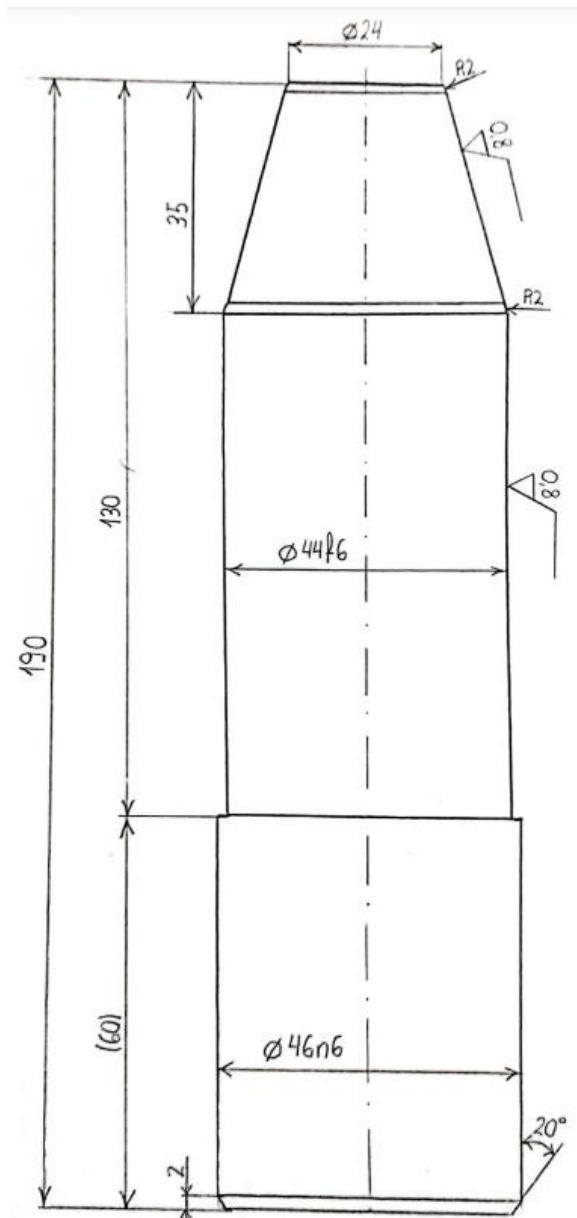


Slika 6.8. Konstruiranje U-krivulje pomoću Crafts-Lamontovog dijagrama i Jominyeve krivulje

Crafts-Lamontovi dijagrami koriste se za konstrukciju U-krivulje, što predstavlja putanju promjene tvrdoće. U ovom primjeru, uzeli smo šipku promjera 80 mm i ohladili je u mirnoj vodi (označeno s  $H = 1$ ) nakon što je bila izložena visokoj temperaturi. Prvi korak je odabrati odgovarajući promjer šipke na Crafts-Lamont dijagramima. Zatim koristimo Jominyevu krivulju kako bismo očitali tvrdoću na površini uzorka ( $d/D = 1$ ), u sredini uzorka ( $d/D = 0$ ), i na mjestu koje je udaljeno 8 mm od površine ( $d/D = 0,8$ ). Nakon toga, crtamo horizontalne linije na dijagramima tvrdoće za te vrijednosti tvrdoće na uzorku. Gdje te horizontalne linije presijeku odabrane promjere, dobivamo točke koje tvore U-krivulju.

## 7. PROCJENA DUBINE PROKALJIVANJA STROJNOG DIJELA GE.23-PP.42

Praktični dio ovog završnog rada baviti će se procjenom dubine prokaljivanja strojnog dijela GE.23-PP.42. Strojni dio GE.23-PP.42 izrađen je od sljedećih materijala: C45E, 42CrMo4 i 50CrV4. Zadani primjeri će biti gašeni u ulju. Intenzitet gašenja u ulju iznosi  $H = 0,35$ .



Slika 7.1.. Zadani predložak

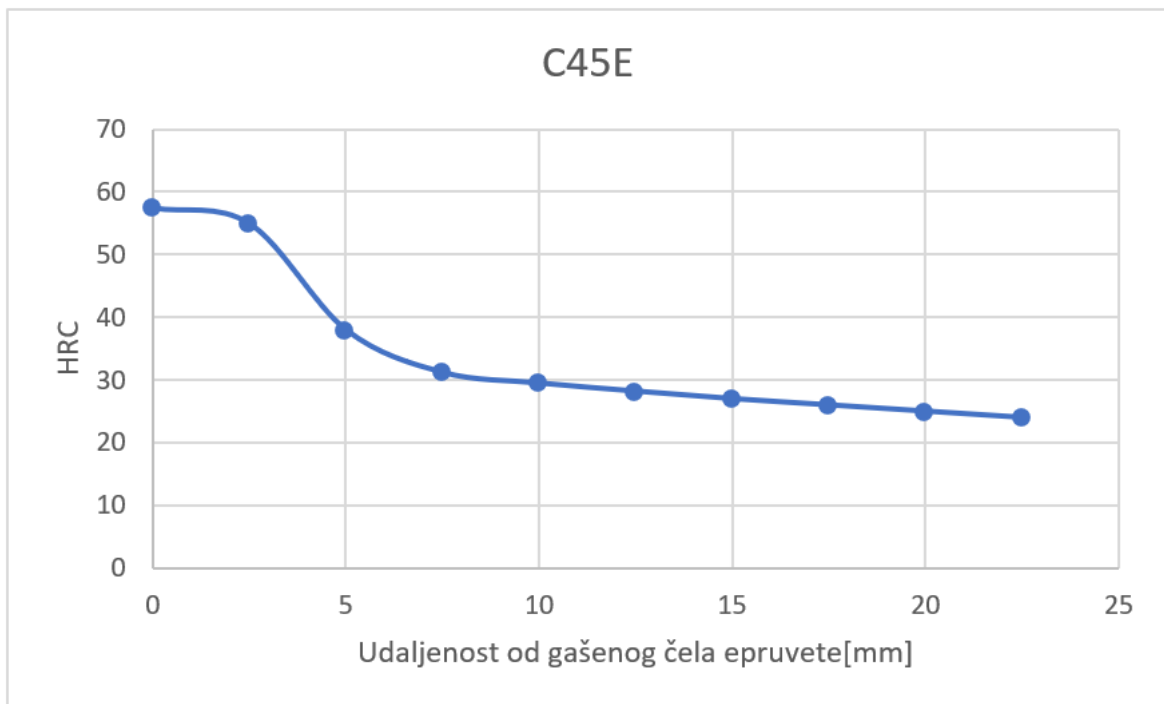
## 7.1. Čelik C45E

Kemijski sastav pet talina čelika C45E možemo vidjeti u tablici 1.

TALINA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ca	Mo	Ni	V
	0,44	0,22	0,66	0,022	0,029	0,15	n, b,	n, b,	n, b,	0,02

Tablica 1. Kemijski sastav čelika C45E

Jominyjeva krivulja za čelik C45E prikazana je na slici 7.1.



Slika 7.2. Jominyjeva krivulja za čelik C45E

Da bismo stvorili U-krivulje koje pokazuju kako se tvrdoća raspoređuje unutar strojnog dijela GE.23-PP.42 nakon gašenja u ulju s intenzitetom gašenja  $H = 0,35$  (ili  $H = 1$ ), koristimo Jominyevu krivulju i Crafts-Lamont dijagrame.

Prvo, za zadanu veličinu strojnog dijela od 46 mm i intenzitet gašenja  $H = 0,35$ , koristimo Crafts-Lamont dijagrame kako bismo odredili Jominyevu udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ . Na primjer, za središte strojnog dijela koristi se omjer  $d/D = 0$ , dok se na površini koristi omjer  $d/D = 1$ . Rezultati Jominyevih udaljenosti za različite omjere  $d/D$  i različite razine intenziteta ohlađivanja zatim se prikazuju u tablici 2. Ova tablica će nam pomoći u konstrukciji U-krivulja kako bismo

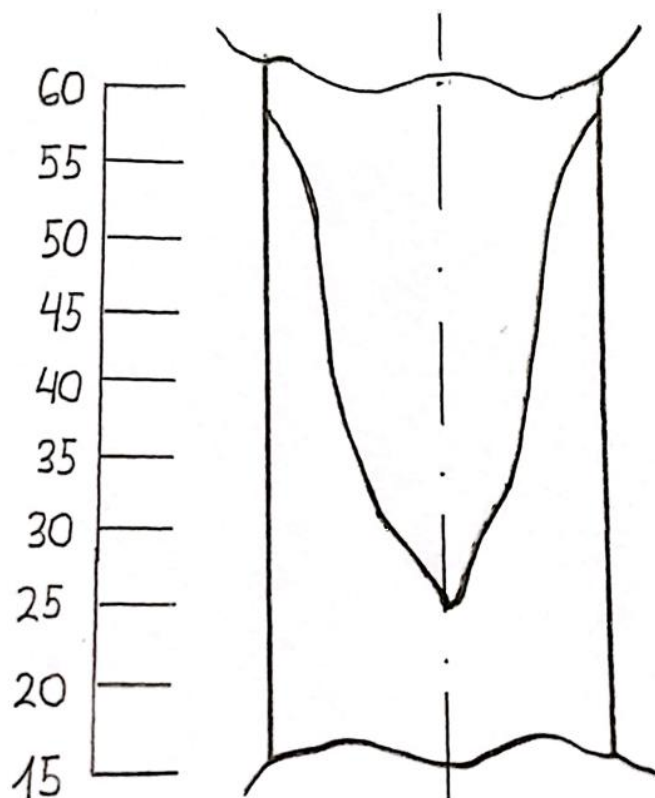
bolje razumjeli kako se tvrdoća raspoređuje unutar strojnog dijela nakon određenog procesa gašenja u ulju.

d/D	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost za H = 0,35	18	17	17	16	16	15	15	14	13	12	11

*Tablica 2. Vrijednosti očitane iz Crafts-Lamontovih dijagrama*

Nakon što dobijemo Jominyjeve udaljenosti koristeći Crafts-Lamont dijagrame za različite omjere d/D, trebamo se vratiti na Jominyjevu krivulju. Na toj krivulji, koristimo dobivene vrijednosti Jominyjeve udaljenosti kako bismo očitali odgovarajuće tvrdoće za svaku točku.

Nakon toga, stvaramo U-krivulju kako bismo vizualizirali kako se tvrdoća raspoređuje unutar presjeka zadanog strojnog dijela. Rezultirajuća U-krivulja prikazana je na slici 7.2. Ove krivulje pomažu nam bolje razumjeti kako se tvrdoća materijala mijenja na različitim dubinama presjeka nakon specifičnog procesa gašenja. U prilogu ispod prikazt će se U-krivulju za H=1 prema krivulji na slici 7.2..



*Slika 7.3. U-krivulja (tok tvrdoće) po presjeku strojnog dijela za čelik C45E*

Prema prikazanom toku tvrdoće, odnosno U-krivulji minimalna tvrdoća iznosi 24 HRC. Kako je tvrdoća na gornjem dijelu U-krivulje veća od 50, to govori kako je strojni dio za čelik C45E prokaljiv.



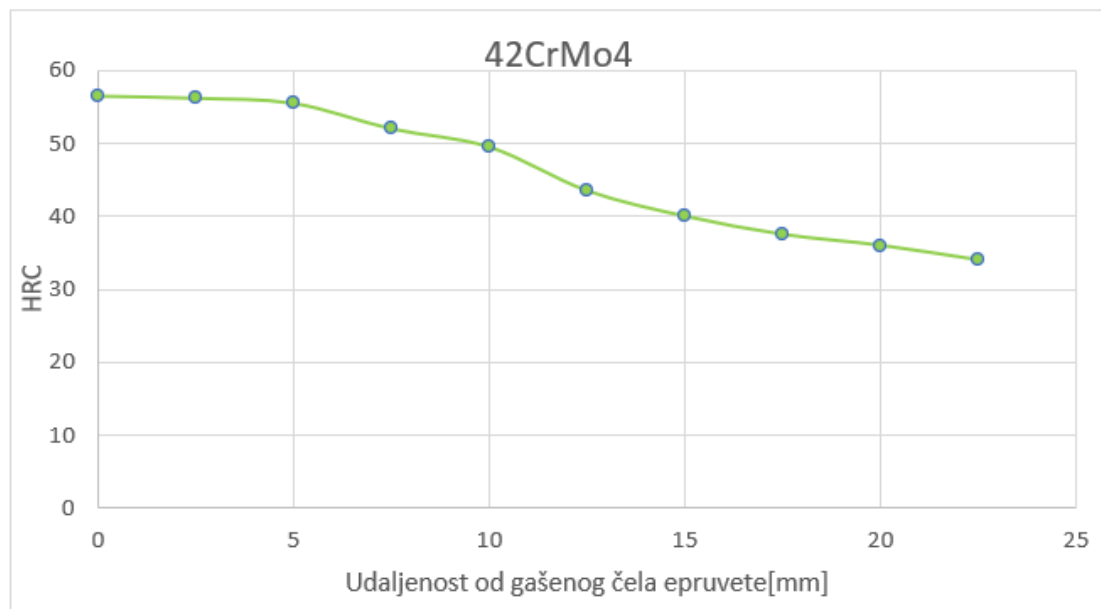
## 7.2. Čelik 42CrMo4

Postupak ponavljamo i za druga dva čelika. U tablici 3. možemo vidjeti kemijski sastav pet talina čelika 42CrMo4.

TALINA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	0,39	0,15	0,50	0,013	0,014	0,97	0,19	0,19	0,2	<0,01

Tablica 3. Kemijski sastav čelika 42CrMo4

Joiminyjeva krivulja za čelik 42CrMo4 prikazana je na slici 7.3.



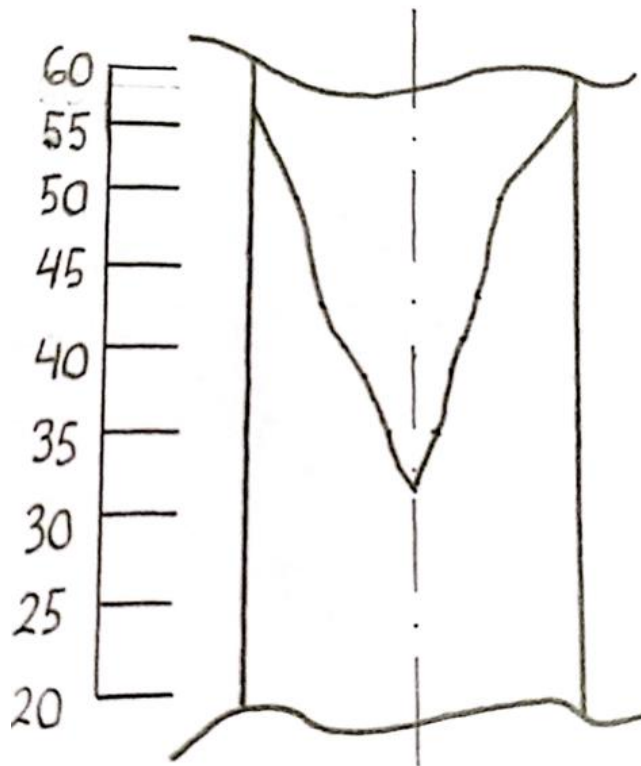
Slika 7.4.. Jominyjeva krivulja za čelik 42CrMo4

Zatim koristimo Crafts-Lamont dijagrame kako bismo odredili Jominyevu udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ . Rezultate Jominyevih udaljenosti za različite omjere  $d/D$  i različite razine intenziteta ohlađivanja prikazane su u tablici 4.

d/D	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost za H = 0,35	18	17	17	16	16	15	15	14	13	12	11

Tablica 4. Vrijednosti očitane iz Crafts-Lamontovih dijagrama

Nakon što dobijemo Jominyjeve udaljenosti koristeći Crafts-Lamont dijagrame za različite omjere d/D, trebamo se vratiti na Jominyjevu krivulju. Dobivene vrijednosti Jominyjeve udaljenosti koristimo kako bismo očitali odgovarajuće tvrdoće za svaku točku. Zatim konstruiramo pripadajuću U-krivulju. U prilogu ispod prikazt će se U-krivulju za H=1 prema krivulji na slici 7.4..



Slika 7.5.. U-krivulja (tok tvrdoće) po presjeku strojnog dijela za čelik CrMo4

Prema U-krivulji prikazanoj na slici 7.5. minimalna tvrdoća iznosi 33 HRC. Kako je tvrdoća na gornjem dijelu U-krivulje veća od 50, to govori kako je strojni dio za čelik CrMo4 prokaljiv.

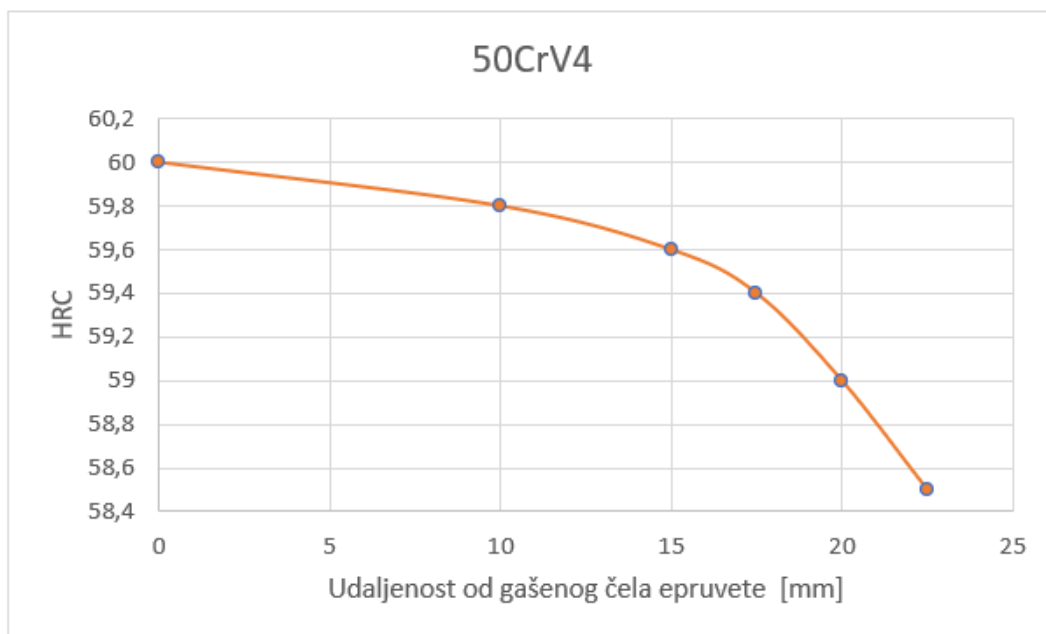
### 7.3. Čelik 50CrV4

U tablici 5. možemo vidjeti kemijski sastav pet talina čelika 50CrV4.

TALINA	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo	Ni	V
	0,53	0,27	0,93	0,029	0,013	0,98	0,2	0,05	0,33	0,07

Tablica 5. Kemijski sastav čelika 50CrV4

Jominyjeva krivulja za čelik 50CrV4 prikazana je na slici 7.5.



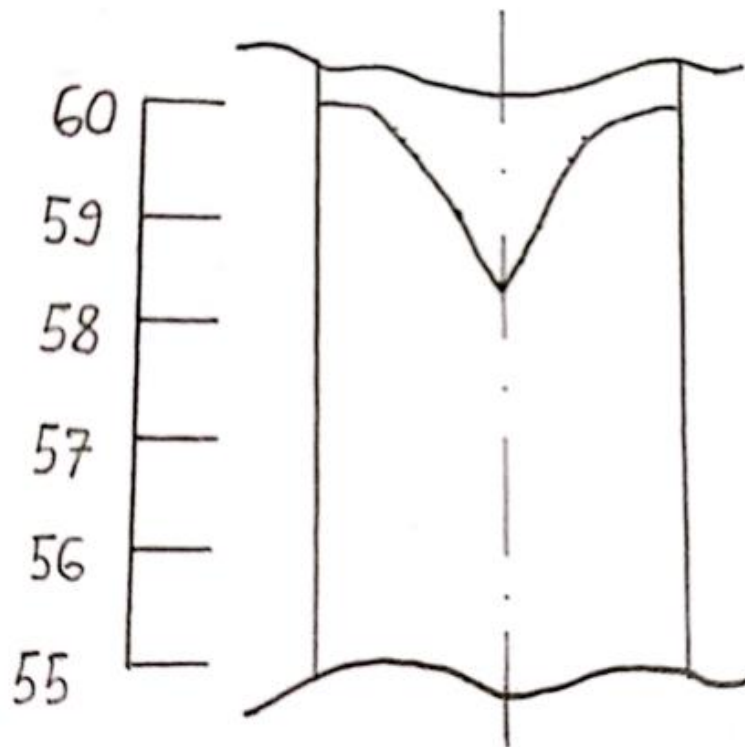
Slika 7.6. Jominyjeva krivulja za čelik 50CrV4

Zatim koristimo Crafts-Lamont dijagrame kako bismo odredili Jominyevu udaljenost na različitim omjerima  $d/D$ . Rezultate Jominyevih udaljenosti za različite omjere  $d/D$  i različite razine intenziteta ohlađivanja prikazane su u tablici 6.

d/D	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1
Jominyjeva udaljenost za H = 0,35	18	17	17	16	16	15	15	14	13	12	11

Tablica 5. Vrijednosti očitane iz Crafts-Lamontovih dijagrama

Nakon što dobijemo Jominyjeve udaljenosti koristeći Crafts-Lamont dijagrame za različite omjere d/D, trebamo se vratiti na Jominyjevu krivulju. Dobivene vrijednosti Jominyjeve udaljenosti koristimo kako bismo očitali odgovarajuće tvrdoće za svaku točku. Zatim konstruiramo pripadajuću U-krivulju. U prilogu ispod prikazt će se U-krivulju za H=1 prema krivulji na slici 7.6..



Slika 7.7. U-krivulja (tok tvrdoće) po presjeku strojnog dijela za čelik 50CrV4

U ovom slučaju minimalna tvrdoća iznosi 58.5 HRC. Kako je tvrdoća na gornjem dijelu U-krivulje veća od 50, to govori kako je strojni dio za čelik 50CrV4 prokaljiv.

## 8. ZAKLJUČAK

U ovom radu provedena je analiza procjene dubine prokaljivanja zadanog strojnog dijela. Kako bi se ta analiza provela potrebno je poznavati neke osnovne karakteristike prokaljivanja koje su opisane na samom početku ovoga rada, kao što su neke osnove o čelicima i o toplinskoj obradi. Prema daljnjim poglavljima može se zaključiti da se tvrdoća čelika može povećati raznim metodama. Također, u sklopu ovoga rada opisan je utjecaj legirajućih elemenata na ravnotežni dijagram stanja Fe-Fe<sub>3</sub>C. Potom je objašnjena kaljivost kao potupak kojim se može povećati tvrdoća nekog strojnog dijela. Također, bitno je napomenuti kako je tvrdoća veća što je veći dio ugljika prisutan.

Prema posljednjem poglavlju ovoga završnog rada može zaključiti da je Jominyeva metoda najjednostavnija i najkorištenija metoda za procjenu prokaljivosti, ista je korištena i u praktičnom dijelu ovoga završnog rada kako bi se procijenila dubina prokaljivanja zadanog predloška. Time je teoretski dio ovoga završnog rada primijenjen za procjenjivanje prokaljivosti konkretnog strojnog dijela.

## 9. LITERATURA

- [1] Iljkić, D.: „Materijali II“, materijali s predavanja, Merlin, 2020.
- [2] Stjepan Kožuh: „Specijalni čelici“, Sisak
- [3] Filetin, T.; Kovačićek, F.; Indof, J.: „Svojstva i primjena materijala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2013.
- [4] Stupnišek, M.; Cajner, F.: „Osnove toplinske obrade metala“, Fakultet strojarstva i brodogradnje, Zagreb, 2001.
- [5] Smoljan, B.: „Osnove toplinske obrade čelika“, Sveučilište u Rijeci, Rijeka, 1997.
- [6] Gabrić, I.; Šitić, S.: „Materijali II“, Sveučilite u Splitu, Split, 2015.
- [7] Smoljan, B.: „Toplinska obrada čelika, sivog i nodularnog lijeva“, Hrvatsko društvo za toplinsku obradbu i inženjerstvo površine, Zagreb, 1999.
- [8] Pedišić, Lj.; Matijević, B.; Munić, J.: „Utjecaj koncentracije vodomješivih tekućina za obradbu metala na sposobnost ohlađivanja“, Goriva i maziva, vol. 47, br. 6, str. 437-449, 2008.
- [9] Gabrić, I.: „Materijali 2 – praktikum za laboratorijske vježbe“, Sveučilište u Splitu, Split, 2018.
- [10] Norma: HRN EN ISO 642, 2008.

## 10. POPIS SLIKA

Slika 2.1. Opća podjela čelika.....	3
Slika 3.1. Opći dijagram postupka toplinske obrade.....	5
Slika 4.1. Dijagram stanja Fe-Fe <sub>3</sub> C .....	6
Slika 4.2. Binarni dijagram Fe-Le s gamagenim legirnim elementima.....	7
Slika 4.3. Binarni dijagram Fe-Le s alfagenim legirnim elementima.....	8
Slika 4.4. Shema izotermičke tvorbe austenita.....	9
Slika 4.5. Shema tvorbe austenita pri konstantim uvjetima ugrijavanja .....	10
Slika 4.6. Promjena veličine austenita pri konstantim uvjetima ugrijavanja.....	11
Slika 4.7. Ovisnost brzine i temperature u perlitnoj pretvorbi .....	12
Slika 4.8. Shema tvorbe perlita.....	13
Slika 4.9. Kristalna rešetka martenzita .....	14
Slika 4.10. Utjecaj udijela ugljika na temperaturu martezitne pretvorbe.....	15
Slika 4.11. Iglčasta martezitna struktura .....	15
Slika 4.12. Ovisnost udijela ugljika u primarnom austenitu o količini zaostalog austenita .....	16
Slika 4.13. Utjecaj udjela na tvrdoću martenzita .....	16
Slika 4.14. Burnsov dijagram.....	17
Slika 4.15. Grafički prikaz bainitne pretvorbe.....	18
Slika 4.16. Tvorba bainita.....	19
Slika 4.17. Konstrukcija TTT dijagrama .....	20
Slika 4.18. TTT-dijagram za izotermičko ohlađivanje .....	22
Slika 4.19. TTT-dijagram za kontinuirano ohlađivanje .....	23
Slika 4.20. Utjecaj legirajućih elemenata na TTT-dijagrame .....	24
Slika 5.1. Burnsov dijagram.....	25
Slika 5.2. Koncentracija ugljika u austenitu nakon austeniziranja nadeutektoidnog čelika različitih udjela ugljika.....	27
Slika 5.3. TTT-dijagrami kontinuiranog ohlađivanja dvaju različitih čelika .....	29
Slika 6.1. Određivanje kritičnog promjera D prema Grossman-u .....	31
Slika 6.2. "U" krivulje za čelike različitih promjera .....	33
Slika 6.3. Standardizirani uzorak za Jominy pokus .....	34
Slika 6.4. Hlađenje epruvete udarom mlaza vode o glatko čelo.....	35
Slika 6.5. Ispitivanje tvrdoće .....	36
Slika 6.6. Krivulje ohlađivanja Jominyjeve epruvete prikazane u TTT-dijagramu .....	37
Slika 6.7. Crafs-Lamontovi dijagrami .....	38
Slika 6.8. Konstruiranje U-krivulje pomoću Crafts-Lomontovog dijagrama i Jominyjeve krivulje .....	38
Slika 7.1. Zadani predložak.....	39
Slika 7.2. Jominyjeva krivulja za čelik C45E.....	40
Slika 7.3. U-krivulja (tok tvrdoće) po presjeku strojnog dijela za čelik C453 .....	42
Slika 7.4. Jominyjeva krivulja za čelik 42CrMo4 .....	43
Slika 7.5. U-krivulja (tok tvrdoće) po presjeku strojnog dijela za čelik CrMo4.....	44
Slika 7.6. Jominyjeva krivulja za čelik 50CrV4.....	45
Slika 7.7. U-krivulja (tok tvrdoće) po presjeku strojnog dijela za čelik 50CrV4.....	46

## 11. POPIS TABLICA

Tablica 1. Kemijski sastav čelika C45E.....	40
Tablica 2. Vrijednosti očitane iz Crafts-Lomontovih dijagrama .....	41
Tablica 3. Kemijski sastav čelika 42CrMo4.....	43
Tablica 4. Vrijednosti očitane iz Crafts-Lomontovih dijagrama .....	44
Tablica 5. Kemijski sastav čelika 50CrV5 .....	45
Tablica 6. Vrijednosti očitane iz Crafts-Lomontovih dijagrama .....	46



## 12. SAŽETAK I KLJUČNE RIJEČI

### Sažetak

Cilj ovog završnog rada bio je procijeniti dubinu prokaljivanja strojnog dijela GE.23-PP.42. U radu opisane su neke osnove o samim čelicima i toplinskim obradama. Detaljnije je objašnjen utjecaj legirajućih elemenata na ravnotežni dijagram stanja, te tvorba austenita i pretvorba pothlađenog austenita. Osim toga, detaljno je objašnjen postupak kaljivosti kao postupak povećanja tvrdoće na nekom strojnom dijelu, te podjela kaljivosti na zakaljivost i prokaljivost. Nakon oga opisane su same metode procjene prokaljivosti nekoga strojnoga dijela. Time je završen teorijski dio ovoga rada, nakon čega je proveden praktični dio procjenjivanja dubine prokaljivanja zadanog strojnog dijela gdje je primjenjena Jominyeva metoda kao cilj ovoga rada.

### Absract

The aim of this final work was to evaluate the depth of hardening of the machine part GE.23-PP.42. The paper describes some basics about the steels themselves and heat treatments. The influence of alloying elements on the equilibrium state diagram, as well as the formation of austenite and the transformation of undercooled austenite, are explained in more detail. In addition, the process of hardening is explained in detail as a process of increasing the hardness of a machine part, and the division of hardenability into hardenability and hardenability. After that, the methods of assessing the hardenability of a machine part are described. This concludes the theoretical part of this work, after which the practical part of assessing the depth of hardening of the given machine part was carried out, where the Jomin method was applied as the goal of this work.

### Ključne riječi

Toplinska obrada, prokaljivost, Jominyeva metoda, kaljenje, čelici, fazne pretvorbe, tvrdoća.

### Key words

Heat treatment, hardenability, Jominev method, hardening, steels, phase transformations, hardness.